

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

KATEDRA TVÁŘENÍ MATERIÁLU

Vliv vstupního rozměru polotovaru na tvařitelnost při děrování na VM
Influence of the workpiece input on the formability at tube piercing on the VM

Student:

Radek Jurča

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jiří Kliber, CSc.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student:

Radek Jurča

Studijní program:

B2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor:

2109R034 Technologie tváření a úpravy materiálu

Téma:

Vliv vstupního rozměru polotovaru na tvaritelnost při děrování na VM
Influence of the workpiece input on the formability at tube piercing on
the VM

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teorie děrování (princip děrování), stavy napjatosti, poloha děrovacího hrotu
3. Popis technologického zařízení VM
4. Návrh experimentu
5. Vyhodnocení, výpočty koeficientů prodloužení, porovnání struktury (velikosti zrna), deformační textury v příčném i podélném směru
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] POČTA, B. *Ocelové trubky a jejich použití*. SNTL Praha 1954.
- [2] POČTA, B. *Ocelové trubky*. I. díl, Bezešvé trubky SNTL Praha 1963.
- [3] KOMORI, K. Simulation of Mannesmann piercing process by the free-dimensional rigid-plastic finite-element method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(2005), 1838-1853.
- [4] CHASTEL, Y., DIOP, A., FANINI, S., BOUCHARD, P. O. Finite element modeling of tube piercing and creation of a crack. *International Journal of Material Forming* 1, Supplement 1 (2008), Pages 355-358.
- [5] FANINI, S., GHIOTTI, A., BRUSHI, S. Prediction of the fracture due to Mannesmann effect in tube piercing. *AIP Conference Proceedings* 908, 1407 (2007).

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jiří Kliber, CSc.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Kamil Jochym

Datum zadání: 29.11.2013

Datum odevzdání: 30.04.2014

prof. Ing. Jiří Kliber, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry. Měl by korespondovat s podobou vnějších desek (viz část III) doplněnou o název práce, umístěný nad spojením **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení je napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a je vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listu vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. jedné strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý

– 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listu. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2013/2014. Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru.

Ostrava 22. 11. 2013

Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 30.4.2014

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

PODĚKOVÁNÍ

Velmi rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Jiřímu Klibrovi, CSc., za vedení při zpracování této práce a konzultantovi Ing. Kamilu Jochymovi za jeho rady při realizaci této práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům TŽ a.s. – provozu Válcovna trub, úseku technologie výroby a pracovníkům MMV za významnou pomoc při zpracování experimentální části bakalářské práce.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá výrobou bezešvých trub, speciálně kosým válcováním na děrovacím stroji, na Velkém Mannesmannu provozu Válcovny trub, Třineckých železáren a.s. Vzhledem k postupnému přechodu vstupního materiálu od sochorů a ingotů ke kontilitě vsázce došlo k omezení vstupních rozměrů vsázky.

Předložená práce je zaměřena na porovnání struktury materiálu po první tvářecí operaci - děrování, s různou deformací pro jednotlivé průměry vstupních polotovarů. Různé deformace je nutné volit právě pro omezené portfolio vstupních rozměrů z kontilitě vsázky pro celou širší sortimentu trubek vyráběných na Velkém Mannesmannu.

Klíčová slova: Děrování; bezešvá trubka; deformace; Velký Mannesmann.

ABSTRACT

The thesis deals with the production of seamless pipes, specially oblique rolling on piercing machine's operation on a large rolling mills, ovens, Třinecké Železářny, a.s., considering the gradual transition of the input material from billets and ingots to the continuous batch limiting input dimensions of charge.

Submitted work is focused on a comparison of the structure of the material after first forming operation-piercing, with varying deflection for each diameter of input products. Various deformation is necessary to vote for a limited portfolio of input dimensions of continuous charge for the entire breadth of assortment of pipes produced on Big 's.

Keywords: Piercing, seamless pipe, Big Mannesmann.

Obsah

1.Úvod.....	4
2. Teorie výroby bezešvých trubek.....	5
2.1 Způsob výroby dutých předvalků válcováním	5
2.1.1 Děrování na válcových děrovacích strojích.....	5
2.1.2 Děrování na děrovacích strojích kotoučových	6
2.1.3 Děrování na děrovacích strojích s letnými válci	7
2. 2. Teorie kosého válcování.....	8
2.2.1 Teorie děrovacího pochodu.....	8
2.2.2 Kinematické podmínky kosého válcování.....	9
2.2.3 Skluz provalku; koeficienty skluzu	12
2.2.4. Zkrucování provalku	15
2.2.5. Podmínky záběru	16
2.2.6. Vznik dutiny při kosém válcování; stav napjatosti; poloha děrovacího hrotu	19
2. 3. Tvařitelnost oceli	20
2.3.1 Veličiny k popisu rozměrových změn při tváření	21
3. Popis technologického zařízení trati Velký Mannesmann Třineckých železáren	22
3.1 Parametry děrovacího stroje	23
4. Experimentální část	24
4.1 Odběry vzorků a výpočty koeficientů deformace.....	24
4.2 Hodnocení makro a mikrostruktury.....	30
4.3 EBSD analýza vzorku č.8.....	49
5. Závěr.....	59
Seznam použité literatury.....	61

1.Úvod

Výroba trubek je jedním ze speciálních odvětví hutní výroby, které se rozvinulo v minulém století jako výsledek celkového technického pokroku a které dodnes zaujímá významné místo v našem hutnictví. Trubky jako produkt lidské tvořivosti a vynalézavosti používají lidé od nejstarších dob své civilizace. Vývoj výroby a způsob použití trubek jak je známe dnes, trval mnoho let a zejména bezešvé ocelové trubky jsou jedním z velmi mladých výrobků, mnohem mladší, než jiné druhy válcovaného sortimentu. Zdokonalování technologie výroby trubek spolu se zdokonalováním vlastností vyráběných jakostí umožnilo rozvoj některých průmyslových odvětví. Příkladem mohou být třeba těžba ropy a její další zpracování, různá odvětví chemického průmyslu, rozvod plynů a tekutých paliv, a nebo využití trub pro vysokotlaké parní kotle. Většina těchto průmyslových odvětví byla přímo spjata s rozvojem výroby trubek. [1].

Převratem ve výrobě bezešvých trubek byl vynález výroby trubek válcováním. Válcování se sice využívalo při výrobě svařovaných trubek v Anglii a Německu již v první polovině 19. století ovšem výroba bezešvé trubky válcováním byla realizována mnohem později a to až koncem 19. století. Roku 1885 byl udělen bratřím Mannesmannům patent na výrobu bezešvých trubek válcováním pomocí šikmo uložených válců, prakticky však bylo možné tento patent využít mnohem později, v době kdy byl původní způsob výroby doplněn o příčné rozválcování trubek na poutnické stolicí. Teprve kombinace těchto způsobů umožnila výrobu tenkostěnných a dostatečně dlouhých trubek. [1].

Z důvodu patentové ochrany vynálezu bratří Mannesmannů ve všech průmyslově a technicky vyspělých zemích, hledaly se z konkurenčních důvodů odlišné způsoby výroby bezešvých trubek, kterými by bylo možné patent obejít. Z různých navrhovaných způsobů výroby bezešvých trubek se osvědčil nejvíce způsob Stiefelův z.r. 1895, který se postupem času rozšířil z USA také do jiných zemí. V Evropě se z různých způsobů výroby bezešvých trubek rozšířilo zejména válcování na poutnických stolicích dle původního Mannesmannova způsobu. [2].

V dalších letech začaly vznikat spojitě válcovací tratě na výrobu bezešvých trubek. Tyto tratě se vyznačují vysokou výkonností při výrobě velkých sérií trubek v omezeném výrobním rozsahu. Tyto tratě většinou využívají Diescherova způsobu děrování, což je kosé válcování doplněné o příčné válcovací kotouče. [1].

U nás se začaly bezešvé trubky vyrábět velmi brzy po zavedení způsobu bratří Mannesmannů. Firma Mannesmann založila již v roce 1886 v bývalém Rakousko-Uhersku svou sesterskou společnost, která zahájila výrobu bezešvých trubek v letech 1886 až 1888 v Chomutově. Kromě Mannesmannova způsobu výroby bezešvých trubek, který je u nás nejrozšířenější, byla na počátku 20.století zavedena ve Vítkovických železárnách výroba způsobem Stieflovým a u bývalé firmy Hahn v Bohumíně způsobem Erhardtovým, válcováním na tzv. švédském duu. Z důvodu vyšší spolehlivosti bezešvých trubek oproti trubkám svařovaným, se tyto častěji využívají v ropném a plynářském průmyslu [2, 3].

Dnes se u nás vyrábí bezešvé trubky Mannesmannovým způsobem v Třineckých železárnách, a.s. - provozovna v Ostravě (bývalé Vítkovické železářny) a rovněž v Chomutově. Stiefelův způsob výroby bezešvých trubek je pak využíván ve firmě Arcelor Mittal v Ostravě.

Předložená práce se bude zabývat problematikou kosého válcování na trati Velký mannesmann Válcovny trub (dále jen VT), dříve akciové společnosti, v současnosti jednoho z provozů společnosti Třinecké železářny, a.s. Práce se bude zabývat děrováním kontisliček různého vstupního průměru a porovnáním deformací, koeficientů prodloužení a a výsledných struktur při různých stupních celkové deformace.

2. Teorie výroby bezešvých trubek

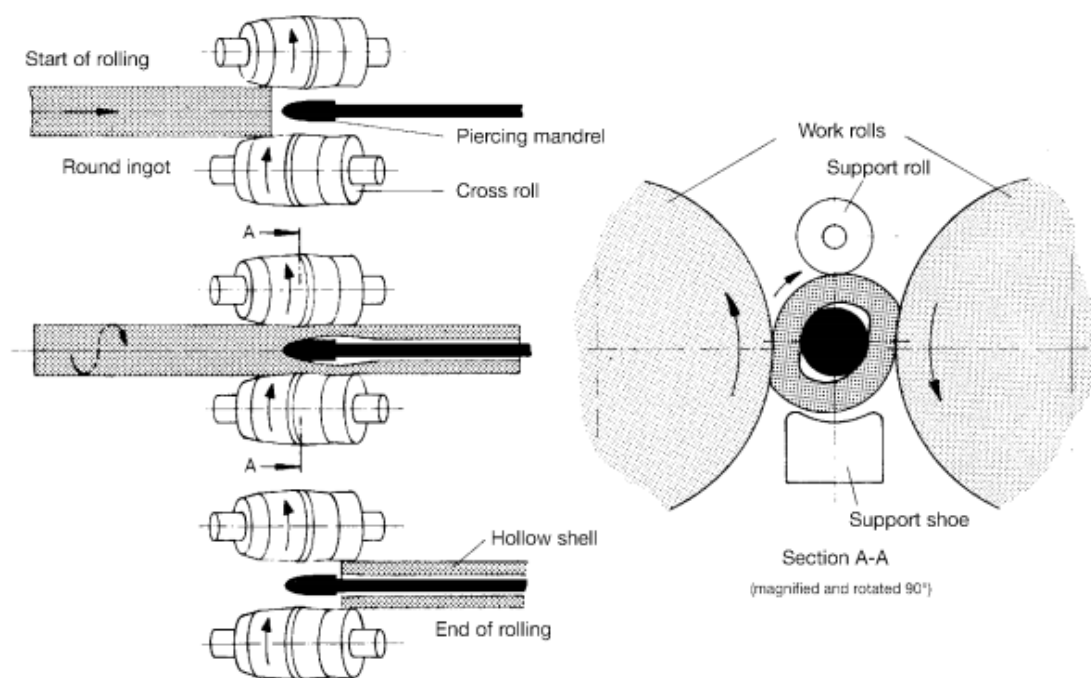
2.1 Způsob výroby dutých předvalků válcováním

Duté předvalky se vyrábějí buď na děrovacích strojích s kuželovými válci nebo na děrovacích strojích s kotouči nebo na děrovacích strojích s letmo uloženými válci hříbového tvaru. Vlastní princip děrování je pro všechny případy stejný. Jedná se o kosé válcování, při kterém je kruhový sochor, ingot nebo kontislitek vystaven příčnému tlaku od děrovacích válců nebo kotoučů. Jelikož se válce otáčejí ve stejném smyslu, otáčí se mezi nimi účinkem tření a obvodové síly rovněž tvářený materiál v opačném smyslu. Neustále se měnící směr příčného tlaku na materiál, způsobuje uvnitř stálé změny směru napětí [1].

Vzájemná šikmá poloha válců nebo u strojů s děrovacími kotouči přesazení děrovaného materiálu pod rovinou os kotoučů umožňují rozklad obvodové síly válců či kotoučů na dvě složky. První působí v rovině kolmé k ose děrování, v obvodovém směru vzhledem k ingotu, sochoru či kontislitku a způsobuje jeho otáčení mezi válci. Druhá složka síly je kolmá k první složce a působí ve směru osy děrování. Tato složka vtahuje materiál mezi děrovací válce nebo kotouče. Ve všech případech je mezi děrovací válce nebo kotouče vložen děrovací trn, který usměrňuje tok tvářeného materiálu a působí jako třetí válec. Na děrovacím trnu probíhá příčné válcování na požadovanou tloušťku stěny [2].

2.1.1 Děrování na válcových děrovacích strojích

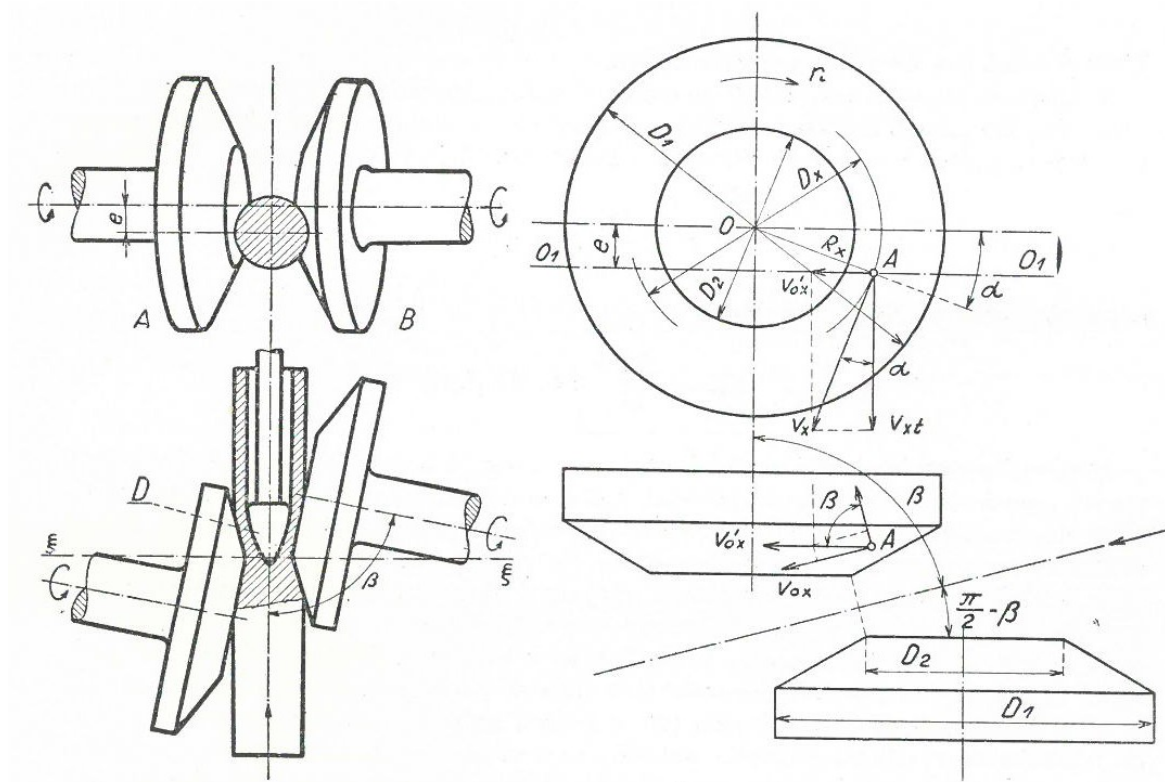
Děrovací válce jsou uloženy tak, že jejich osy spolu svírají ve svislé rovině určitý úhel. Osa děrování je vodorovná a tento úhel pólí. Ve vodorovné rovině jsou osy válců rovnoběžné. Průměty obou os do svislé roviny prokládající osu děrování, protínají v bodě, který leží v tzv. rovině průchodu. To je rovina kolmá k ose děrování v nejužším místě mezi válci. Děrovací válce se otáčejí v souhlasném smyslu a otáčejí zároveň i kruhovým kontislítkem, sochozem či ingotem. Tlakem, jenž na materiál vyvinou pracovní válce, vzniká v materiálu napětí, které vyvolává znik dutiny. Mezi válce je vložen děrovací hrot, jenž usměrňuje vzniklou dutinu a dopomáhá k příčnému rozválcování vstupního materiálu. K tomu dochází ve výstupním kuželu deformačního pásma. Na obrázku č.1 je zobrazení principu mannesmannova děrovacího postupu [2, 4].



Obrázek č. 1 Schéma děrování na válcovém děrovacím stroji [5].

2.1.2 Děrování na děrovacích strojích kotoučových

Pracovní stranu děrovacích kotoučů tvoří komolý kužel. Osy obou kotoučů jsou vzájemně rovnoběžné a jejich poloha je patrna z obrázku č.2. Kuželovitost kotoučů způsobí nejprve zúžení pásma deformace a po té opět jeho rozšíření. Rovina průřezu je $\xi - \xi$, je proložena v nejužším místě mezi kotouči kolmo k ose děrování. Děrovací kotouče se rovněž otáčejí ve stejném smyslu a vytváří rotaci tvářeného materiálu. Trn je vložen mezi kotouče tak aby jeho špička zasahovala do vstupního kužele deformačního pásma. Účinek kuželových ploch kotoučů je tentýž jako účinek kuželových válců. Příčné tlaky vyvolané kotouči, které se zvětšují postupným vtahováním materiálu dále mezi kotouče, vyvolají uvnitř materiálu napětí vedoucí k rozrušení středových vrstev a vzniku dutiny [1].



Obrázek č.2 Schéma děrování na děrovacím stroji s děrovacími kotouči a složky obvodové síly a rychlosti děrovacích kotoučů

Z popisu je patrné, že mezi uvedenými způsoby děrování není zásadní technologický rozdíl. Rozdíl je ve způsobu působení osové síly na tvářený materiál, která jej v případě kotoučů vtahuje mezi sebe. Materiál je veden mezi kotouče pod rovinou, procházející osami válců. Tato výstřednost e osy děrování vzhledem k osové rovině děrovacích kotoučů způsobuje rozklad obvodové síly P na dvě složky, z nichž jedna materiálem otáčí P_t a druhá, rovnoběžná s osou děrování, materiál vtahuje mezi kotouče. Kuželovitost pracovních ploch se volí tak velká, aby se stlačením materiálu vyvolalo dostatečné napětí k rozrušení středových vrstev. Zároveň se dbá na to, aby bylo smáčknutí materiálu co nejmenší [2].

2.1.3 Děrování na děrovacích strojích s letnými válci

Děrovací válce těchto strojů mají tvar hříbu a jsou uloženy letmo. Osy válců svírají ve vodorovné rovině s osou děrování úhel 30° a ve svislé rovině úhel $7^\circ 30'$. Tyto úhly je nutné dodržet při každém nastavení válců pro různé vstupní průměry vsázky. Pracovní část je tvořena ze dvou kuželů, jejichž funkce je obdobná jako u předchozích způsobů děrování. Předností děrování na tomto typu děrovacího stroje, je shodná obvodová rychlost válců a rotujícího provalku. Součinitel skluzu v tečném směru je tedy minimální což je pro děrování příznivé [2].

2. 2. Teorie kosého válcování

2.2.1 Teorie děrovacího pochodu

Děrování na strojích s děrovacími válci či kotouči je kosé válcování. Při tomto kosém válcování se uplatňuje vliv příčného válcování materiálu, tj. vliv tlaku válců na tvářený kontislitek, sochor nebo ingot. Tento tlak vyvolává uvnitř materiálu určitá napětí, způsobující při dosažení jistých hodnot trvalou deformaci. Následně pak rozrušení vnitřních vrstev materiálu, a tím vznik dutiny. Samovolný vznik dutiny je však nežádoucí, neboť v dutině dojde k okysličení materiálu vzduchem vnikajícím do předvalku a při dalším válcování na trnu již nedojde ke svaření s ostatním materiálem, vznikají nežádoucí šupiny na vnitřním povrchu předvalku. Proto je nutné volit vhodnou kalibraci děrovacích válců a děrovacího trnu tak, aby se středové vrstvy materiálu rozrušovaly ve středové rovině v místě kontaktu se špičkou děrovacího hrotu. Materiál se sice dělí účinkem napětí, ale průběh jeho další deformace je usměrněn děrovacím trnem. Při takto dodržném postupu děrování mají předvalky hladký vnitřní povrch a samotné děrování probíhá s malou spotřebou energie potřebné pro válcování. Rovněž dochází pouze k malému opotřebení děrovacího hrotu [1, 6].

Děrovací proces je z technologického hlediska značně složitý, v uplynulých dobách se jeho teorie rozpracovávala na základě zákona o zachování objemu, který za jednotku času prochází každým průřezem deformačního pásma mezi děrovacími válci. Tato teorie vedla ke zvětšení délky kužele příčného válcování na děrovacím trnu a rovněž zvětšení délky samotného děrovacího trnu [1].

Stupeň deformace děrovaných kontislitků, sochorů či ingotů v průběhu děrování se vyjadřuje tzv. součinitelem smáčknutí ε , který lze vyjádřit rovnicí:

$$\varepsilon = \frac{d_0 - b}{d_0} \quad (1)$$

kde ε - součinitel smáčknutí,

b - vzdálenost mezi válci v nejužším místě (největší průměr válců),

d_0 - průměr kontislitku, sochoru nebo ingotu.

Absolutní smáčknutí

$$\Delta d = d_0 - b \quad (2)$$

se volí $(0,07 - 0,15) \cdot d_0$

Součinitel smáčknutí vyjadřuje poměrné smáčknutí a při určitém rozsahu absolutního smáčknutí bývá $\varepsilon = 7 - 15 \%$

2.2.2 Kinematické podmínky kosého válcování

Pro podrobnější rozbor děrování musíme popsat kinematické podmínky děrování. Jestliže známe otáčky válců n a ty jsou pro válce konstantní, lze určit obvodovou rychlost válců v libovolném průřezu D_x z rovnice:

$$u_x = \frac{\pi \cdot D_x \cdot n}{60} \quad (3)$$

Jelikož je válec k ose děrování skloněn o úhel α , rozkládá se obvodová rychlost na dvě složky a to složku v_{0x} ve směru osy děrování a složku v_{tx} , která je na ní kolmá. Tato složka rychlosti působí ve směru tečném k obvodu děrovaného kontislitku, sochoru či ingotu. Obě složky lze vyjádřit pomocí rovnic:

$$v_{0x} = u_x \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

$$v_{tx} = u_x \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

Na obrázku č.3 je zobrazeno schéma kosého válcování. Válce o průměru D se otáčejí ve stejném smyslu a vzhledem ke svému kuželovitému tvaru se v průběhu válcování k sobě vzájemně přibližují. Tímto vyvozují na válcovaný materiál určitý tlak P . Za jednu otáčku válců, při níž libovolný bod na povrchu válců urazí i několik metrů (v závislosti na průměru děrovacích válců), přiblíží se válce o několik milimetrů, aby vyvodili potřebný tlak P na válcovaný materiál. Z tohoto důvodu lze při zkoumání kinematických podmínek válcování zanedbat pohyb válců ve směru tlaku na válcovaný materiál a uvažovat pouze s kinematickými podmínkami vyvolanými otáčením válců [2].

Obvodové síly obou válců T vyvolávají točivou dvojici na ramenu d , jehož velikost odpovídá průměru tvářeného materiálu. Malé stlačení přitom zanedbáme. Tato silová dvojice vytváří točivý moment

$$M = T \cdot d \quad (6)$$

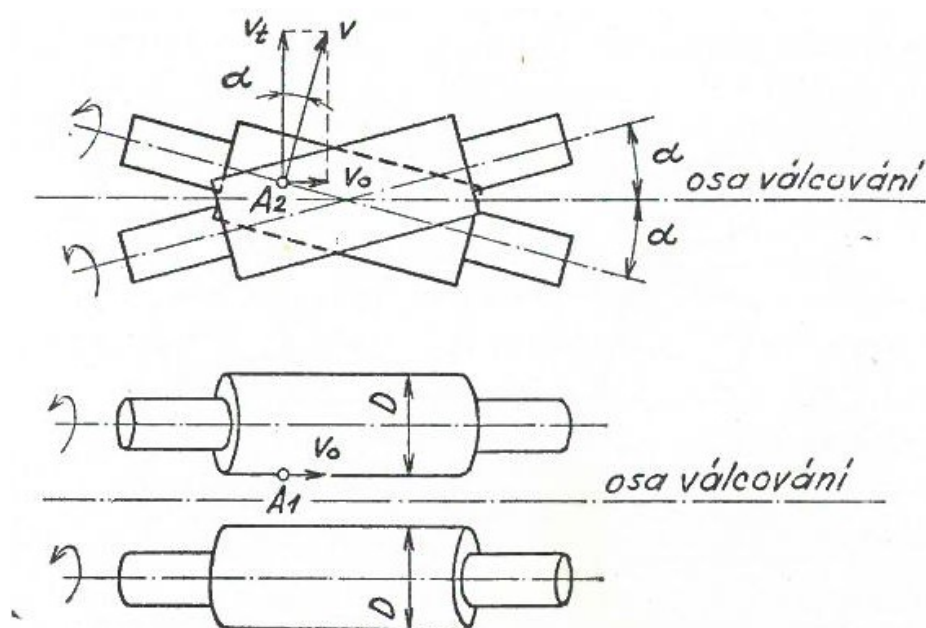
který způsobuje rotaci materiálu v opačném smyslu, než-li se otáčejí pracovní válce. Tato rotace je nezbytná pro vytvoření tlaku P v průběhu jedné otáčky materiálu ve všech radiálních směrech a vytvořil dostatečné podmínky stavu napjatosti, pro tvorbu dutiny ve válcovaném materiálu [1].

Při kosém válcování jsou osy válců vzájemně mimoběžné a ve svislé rovině se protínají jako různoběžky. Ve vodorovné rovině jsou potom rovnoběžné. Schéma vzájemné polohy cylindrických válců s takto uspořádanými osami je zobrazeno na obrázku č.3.

Obvodovou rychlost libovolného bodu A na povrchu válců lze rozložit na dvě složky a to na složku působící ve směru osy děrování :

$$v_0 = v \cdot \sin \alpha = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

Tato složka obvodové rychlosti je rychlost posuvná, kterou prochází materiál pásmem deformace mezi válci.

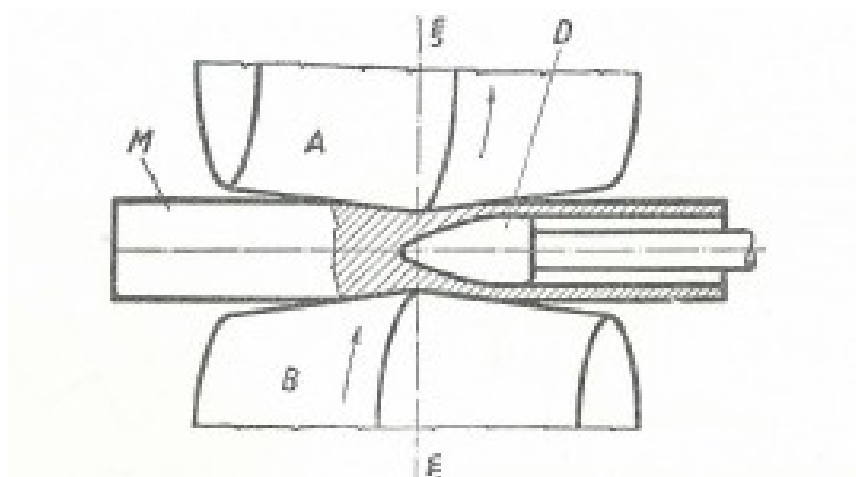


Obrázek č.3 Princip kosého válcování

Druhou složkou obvodové rychlosti je složka v_t , která je tečnou k válcovanému materiálu a je tedy obvodovou rychlostí rotujícího materiálu. Vypočteme ji z rovnice :

$$v_t = v \cdot \cos \alpha = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

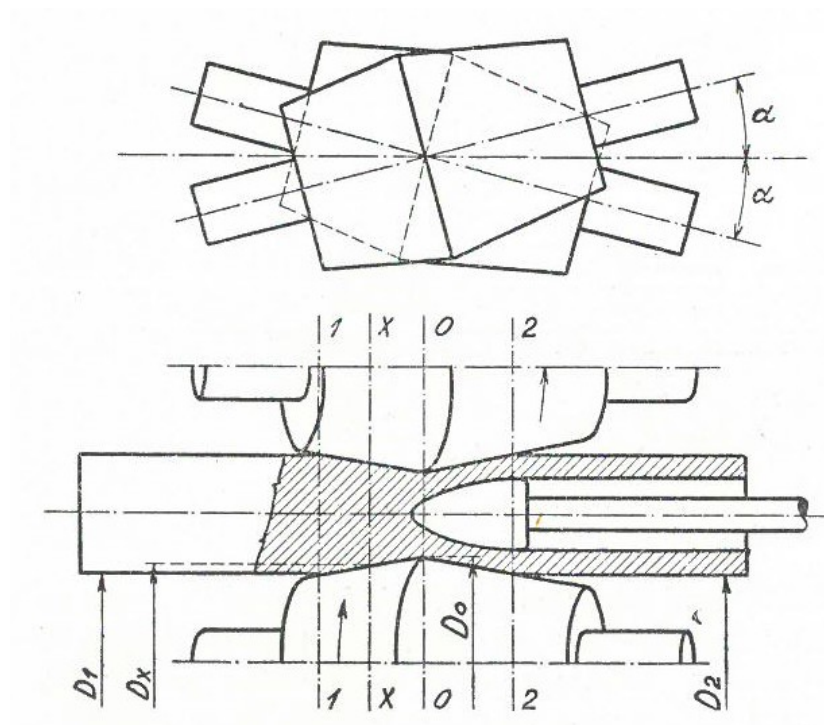
Při výrobě dutých předvalků kosým válcováním je ovšem nutné vyvodit na tvářený materiál určitý tlak, jenž se zvětšuje. Toho je dosaženo tvarem válců. Válce mají tvar dvojitého kužele, kdy vzdálenost válců se snižuje v pásmu deformace a po vytvoření dutiny se opět zvětšuje. V této části deformačního pásma již dochází k příčnému válcování předvalku na děrovacím trnu, jenž je vložen mezi děrovací válce což je zobrazeno na obrázku č.4.



Obrázek č.4 Umístění děrovacího trnu mezi děrovacími válci

Z důvodu kuželovitěho tvaru válců, dochází ke změnám obvodové rychlosti v pásnu deformace. Pro kinematické řešení předpokládejme, že válcovaný materiál je ve všech příčných průřezích v pásnu deformace kruhový, takže nastává přímkový styk s válci [2].

Obvodová rychlost válců s n otáčkami za minutu, je na začátku pásma deformace v rovině záběru 1-1 viz.obrázek č.5 :



Obrázek č.5 Schéma děrování na děrovacím stroji s kuželovými válci

$$v_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} \quad (9)$$

v místě největšího průměru válců D_0 , v rovině průchodu 0-0,

$$v_0 = \frac{\pi \cdot D_0 \cdot n}{60} \quad (10)$$

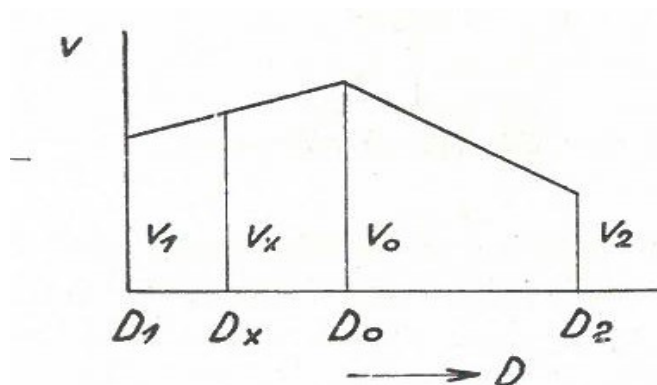
na konci pásma deformace, v rovině výstupu 2-2 , na průměru D_2 ,

$$v_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60} \quad (11)$$

a v libovolném průřezu kde mají válce průměr D_x ,

$$v_x = \frac{\pi \cdot D_x \cdot n}{60} \quad (12)$$

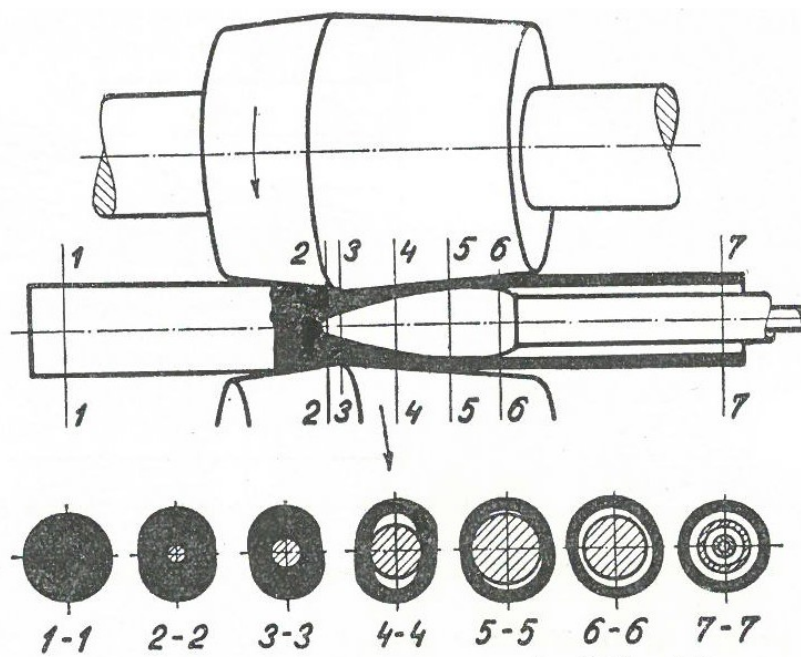
Vzhledem k tvaru válců lze jednoduše sestavit diagram rychlostí v pásnu deformace jenž je zobrazen na obrázku č.6.



Obrázek č.6 Diagram obvodových rychlostí válců v pásnu deformace

2.2.3 Skluz provalku; koeficienty skluzu

Předchozí úvahy o kinematických podmínkách děrování se opíraly o některé zjednodušující předpoklady. Zejména o předpoklad, že provalek je ve všech příčných průřezích pásma deformace kruhový a dotýká se válců v povrchové přímce. Ve skutečnosti jsou geometrické podmínky při děrování mnohem složitější. Kruhový průřez provalku se účinkem tlaku válců v pásnu deformace zdeformuje, takže se válce dotýkají materiálu na ploše, jejíž velikost se po délce pásma deformace neustále mění. Z tohoto důvodu není vnější obrys provalku v pásnu deformace kruhový. Vnitřní obrys vzniklé dutiny je v příčných řezech kruhový jen na počátku příčného rozválcování provalku na děrovacím trnu. Ke konci příčného rozválcování má dutý provalek přibližně oválný tvar s rovnoměrně rozloženou tloušťkou stěny a teprve při výstupu z pásma deformace dostává kruhovitý obrys [2]. Změnu tvaru průřezu provalku při děrování zobrazuje v jednotlivých řezech obrázek č.7



Obrázek č.7 Změna tvaru průřezu provalku při děrování

Pásmo deformace na děrovacím stroji při děrování rozdělujeme na dvě dílčí části, a to:

- a) Děrovací pásmo od příčného průřezu, v němž válce zabírají materiál až do průřezu maximálního stlačení materiálu, tj. průřez maximálního průměru válců. Tento průřez označujeme jako rovinu průchodu.
- b) Pásmo příčného rozválcování - od roviny průchodu až k příčné rovině, ve které se přestávají dotýkat válce a dutý provalek

Dutina vzniká v děrovacím pásmu, do kterého se z technologického hlediska částečně umísťuje děrovací trn. Proto příčné rozválcování nastává již v děrovacím pásmu. Přesto se nejpodstatnější část příčného rozválcování na trnu uskutečňuje až v druhém pásmu. [2].

V průběhu děrování se průřezová plocha provalku v pásmu deformace postupně zmenšuje. Zvláště výrazně se průřez provalku změní v pásmu příčného rozválcování. Dle následujícího vzorce lze určit poměrný úbytek průřezu δ_0 během děrování:

$$\delta_0 = \frac{\Delta F_0}{F_0} \cdot 100 = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100 \quad (13)$$

kde F_0 - průřez výchozího sochoru

F - průřez provalku v libovolném příčném průřezu pásma deformace

Pokud budeme chtít stanovit změnu průřezu mezi postupně stanovenými kroky děrování lze využít vztah:

$$\delta_n = \frac{\Delta F_n}{F_n} \cdot 100 = \frac{F_n - F_{n+1}}{F_n} \cdot 100 \quad (14)$$

kde δ_n je poměrný úbytek průřezu dvou po sobě následujících řezů

F_n - průřez předcházejícího řezu provalku

F_{n+1} - průřez následujícího řezu provalku

Tímto poměrným úbytkem průřezu lze znázornit kolísání velikosti průřezu v pásmu deformace.

Jelikož se plocha průřezu kolmého na osu děrování v pásmu deformace zmenšuje, musí se zvyšovat průměrná rychlost posunu materiálu ve směru osy děrování, neboť množství materiálu, jenž prochází jakýmkoliv příčným průřezem pásma deformace za jednotku času, je stálé. Tyto změny rychlosti toku materiálu nejsou shodné se změnou osově složky obvodové rychlosti válců. Proto nastává skluz materiálu po válcích. Tento skluz vyvolává mezi válcem a provalkem vnější tření, které ovlivňuje velikost průměrné rychlosti toku materiálu v osové směru. Závislost mezi osovou rychlostí provalku a osovou složkou obvodové rychlosti válců se vyjadřuje koeficientem osového skluzu

$$\eta_0 = \frac{u_0}{v_0} \quad (15)$$

kde η_0 je koeficient osového skluzu,

u_0 - osová rychlost provalku,

v_0 - osová složka obvodové rychlosti válců.

Uvedený výraz platí vždy pro určitý průřez pásma deformace. Vzájemný skluz materiálu a válců nastává rovněž v tečném směru. Tento skluz se vyjadřuje koeficientem tangenciálního skluzu

$$\eta_t = \frac{u_t}{v_t} \quad (16)$$

kde η_t je koeficient tangenciálního skluzu,

u_t - obvodová rychlost provalku,

v_t - tečná složka obvodové rychlosti válců.

Rovněž tangenciální skluz se vztahuje vždy na určitý příčný průřez pásma deformace. Stanovení koeficientů skluzů při kosém válcování je značně obtížné vzhledem k jejich proměnlivosti v pásmu deformace. Proto se tyto koeficienty vztahují obvykle na výchozí průřez pásma deformace, v němž končí dotyk materiálu s válcem. Při tomto předpokladu lze koeficient osového skluzu vyjádřit poměrem teoretické a skutečné doby děrování :

$$\eta_0 = \frac{t_s}{t'_s} \quad (17)$$

kde t_s je teoretická doba děrování,

t'_s - skutečná doba děrování (strojní čas změřený časoměříčem)

Posuv rychlosti provalku libovolného průřezu je možno vypočítat s rovnice stálosti objemu procházejícího za jednotku času uvažovaným průřezem:

$$F_1 \cdot u_{01} = F_2 \cdot u_{02} = F_x \cdot u_{0x} = F_p \cdot u_{0p} \quad (18)$$

kde F_1 , F_2 , F_x jsou průřezové plochy v jednotlivých příčných řezech pásma deformace,

u_{01} , u_{02} , u_{0x} - osové (posuvné) rychlosti provalku v uvažovaných průřezích,

F_p - průřez dutého předvalku,

u_{0p} - osová rychlost dutého předvalku vystupujícího z pásma deformace.

Osová rychlost provalku v libovolném příčném řezu F_x pásma deformace u válcových děrovacích stojů lze potom vypočítat ze vztahu:

$$u_0 = \eta_0 \cdot \frac{\pi \cdot D_p \cdot n}{60} \cdot \frac{F_p}{F_x} \cdot \sin \alpha \quad (19)$$

kde D_p je průměr válců na konci pásma deformace.

Koeficient osového skluzu je závislý na mnoha činitelích. Dle výsledků experimentálních prací je dokázáno že se tento koeficient mění s rozměry válcovaných dutých předvalků, se změnou koeficientu prodloužení předvalku, s teplotou, s rychlostí děrování, s tvarem nástrojů a s jinými vlivy. Koeficient skluzu se zvětšuje:

- při zvětšování děrovací rychlosti, zvyšování počtu otáček válců a v menší míře rovněž při zvětšování úhlu vzájemného sklonu válců.
- s rostoucím průměrem vstupního materiálu
- se zmenšující se tloušťkou stěny dutého předvalku
- se zmenšeným stupněm stlačení provalku před děrovacím trnem
- při snížené teplotě děrování, jelikož koeficient vnějšího tření mezi tvářeným materiálem a válcí, respektive trnem, se zvětšuje [2].

2.2.4. Zkrucování provalku

V případě neexistence skluzu materiálu na válcích, by byla obvodová rychlost v jednotlivých průřezích provalku při jeho rotaci rovna velikosti tečné složky obvodové rychlosti válců. Za tohoto předpokladu lze ze známého počtu otáček válců vypočítat počet otáček provalku n_p :

$$\frac{\pi \cdot D_x \cdot n}{60} \cdot \cos \alpha = \frac{\pi \cdot d_x \cdot n_p}{60} \quad (20)$$

odkud

$$n_p = n \cdot \frac{D_x}{d_x} \cdot \cos \alpha \quad (21)$$

Z rovnice vyplývá, že počet otáček jednotlivých průřezů provalku se v pásmu deformace mění. U strojů s děrovacími válci závisí na poměru $\frac{D_x}{d_x}$ a na $\cos \alpha$. Předpokládáme-li určité nastavení sklonu válců, je úhel α stálý a potom má na počet otáček provalku vliv pouze poměr $\frac{D_x}{d_x}$. Mezi průměrem válců a průměrem provalku v libovolném příčném průřezu pásma deformace je tento vztah:

$$D_x + d_x = L \quad (22)$$

kde L je vzdálenost os obou děrovacích válců, která je při určitém nastavení děrovacího stroje stálou hodnotou. Je tedy možno psát, že :

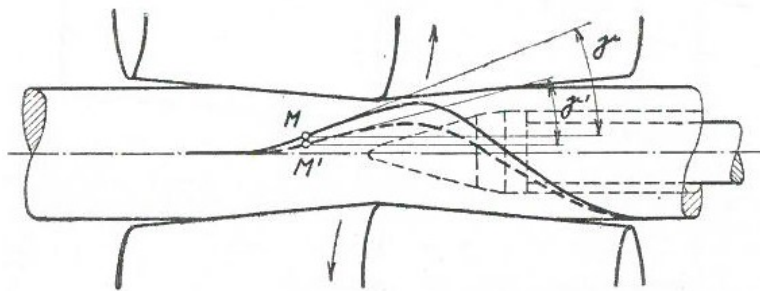
$$D_x = L - d_x \quad (23)$$

Jestliže dosadíme do rovnice pro výpočet otáček provalku, dostaneme vztah:

$$n_p = n \cdot \frac{L}{d_x} \cdot \cos \alpha - n \cdot \cos \alpha \quad (24)$$

Ze srovnání rovnic pro výpočet otáček provalku v libovolném průřezu pásma deformace plyne, že počet závisí na poměru $\frac{L}{d_x}$, který se mění s proměnlivou hodnotou d_x . Provalek se však ve skutečnosti otáčí určitým počtem konstantních otáček. Rozdíl mezi počtem otáček, které by měl provalek mít dle srovnání rovnic a počtem které skutečně má, se

vyrovná zkrucováním provalku. Průběh zkroucení podélného povrchového vlákna po délce pásma deformace je zobrazen na obrázku č.8.



Obrázek č.8 Zkroucení provalku v pásmu deformace

Takový to průběh zkroucení je velmi dobře znám z praxe při vzniku povrchových vad, které probíhají šroubovitě po celé délce předvalku. V důsledku tangenciálních skluzů materiálu v pásmu deformace bude mít provalek menší počet otáček než vále. Tento vliv se vyjadřuje koeficientem tangenciálního skluzu. U válcových děrovacích strojů je kuželovitost válců malá, a proto je možno s dostatečnou přibližností dosadit do příslušných rovnic místo proměnlivého průměru D_x maximální průměr válců D_0 . Dále lze poměry $\frac{D_x}{d_x}$ a $\frac{L}{d_x}$ nahradit poměry $\frac{D_0}{d_p}$ a $\frac{L}{d_p}$, kde d_p je vnější průměr dutého předvalku. Pro praxi lze pak počet otáček provalku vypočítat z rovnice:

$$n_p = \eta_t \cdot n \cdot \frac{D_0}{d_p} \cdot \cos \alpha \quad (25)$$

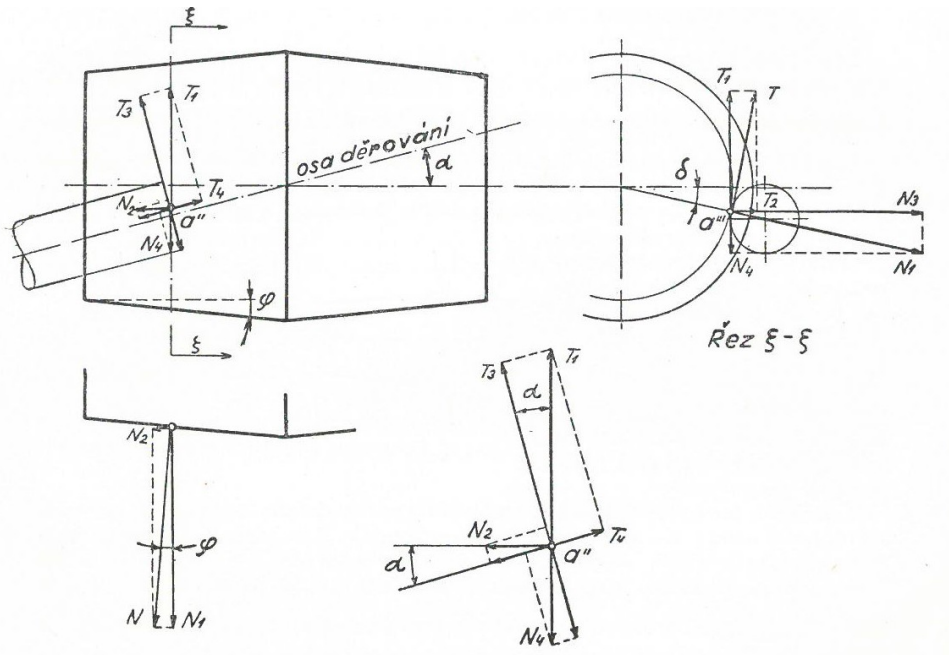
2.2.5. Podmínky záběru

Důležitou úlohou, kterou musíme v teorii děrování rovněž řešit, je stanovení podmínek záběru materiálu při kosém válcování. V praxi se často vyskytují obtíže při záběru vstupního materiálu válci a vznikají tzv. trčáky, které porušují pravidelnost chodu válcování a zaviňují výpadky ve výrobě [1].

Vnější síly působící na válcovaný materiál, jsou jednak síly, kterými působí děrovací válce a jednak tlaky děrovacího trnu a síly tření. K těmto se přidávají dále tlaky vodících válců nebo pravítek a jim příslušející třecí síly. Na počátku válcování, tj. v okamžiku kdy válce uchopí vstupní materiál, působí na něj pouze tlak válců a příslušná třecí síla. Na počátku záběru působí na materiál tlak válců N dle obrázku č.9, kolmý na stykovou plochu, a síla tření T , vyvolaná tímto tlakem a působící v tečném směru na dotykové kružnici proti smyslu relativního pohybu materiálu a válců [2].

Předpokládáme přitom, že tlak válců N , působící kolmo na stykovou plochu, prochází středem vstupního polotovaru. Tlak válců N se jeví v pravé velikosti v půdoryse

(obr.č.9).Může se rozložit do dvou složek : do složky N_1 , která spadá rovině $\xi - \xi$, proložené dotykovým bodem kolmo k ose válce, a složka N_2 , která je k této rovině kolmá.



Obrázek č.9 Síly při záběru provalku válci děrovacího stroje

V náryse se promítá složka N_1 jako složka N_4 , kdežto složka N_2 se zde jeví v pravé velikosti. V bokoryse můžete složku N_1 rozložit do složek N_3 a N_4 . Podle obrázku č.9, lze velikost jednotlivých složek vyjádřit takto:

osové složky (spadající do směru osy děrování)

$$N_2 \cdot \cos \alpha = N \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha \quad (26)$$

$$N_4 \cdot \sin \alpha = N \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha \quad (27)$$

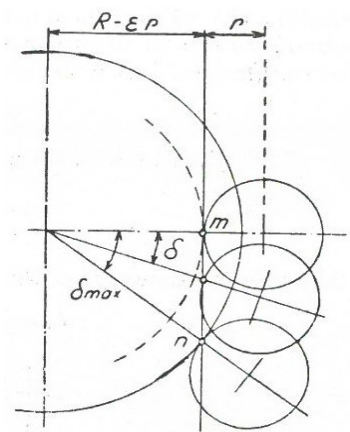
tečné složky

$$N_2 \cdot \sin \alpha = N \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha \quad (28)$$

$$N_4 \cdot \cos \alpha = N \cdot \cos \varphi \cdot \sin \delta \cdot \cos \alpha \quad (29)$$

Význam úhlu δ je patrný z obrázku č.10, který zobrazuje geometrické místo bodů záběru. Ke stanovení podmínek záběru musíme znát ještě osové složky síly tření T . Označíme-li f součinitele tření, pak třecí síla

$$T = f \cdot N \quad (30)$$



Obrázek č.10

Tuto sílu tření lze opět rozložit do dvou složek: do složky T_4 , která spadá do směru osy děrování, a do složky T_3 , která je ke složce T_4 kolmá a leží v rovině kolmé k ose děrování:

$$T_4 = T_1 \cdot \sin \alpha = f \cdot N \cdot \cos \delta \cdot \sin \alpha \quad (31)$$

$$T_3 = T_1 \cdot \cos \alpha = f \cdot N \cdot \cos \delta \cdot \cos \alpha \quad (32)$$

Známe-li síly spadající do směru osy děrování, lze odvodit z rovnováhy sil v osovému směru hledané podmínky záběru: Výsledná vnější síla ve směru osy děrování působící na vstupní materiál musí být větší než nula a působit ve směru děrování. To tedy znamená, že

$$T_4 \geq N_2 \cdot \cos \alpha + N_4 \cdot \sin \alpha \quad (33)$$

Dosadíme-li do této rovnice výše uvedené vztahy, obdržíme rovnici

$$f \cdot N \cdot \cos \delta \cdot \sin \alpha \geq N \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha + N \cdot \cos \varphi \cdot \sin \delta \cdot \sin \alpha \quad (34)$$

Podmínkou záběru z této rovnice je potom:

$$f \geq \frac{\sin \varphi \cdot \cos \alpha + \cos \varphi \cdot \sin \delta \cdot \sin \alpha}{\cos \delta \cdot \sin \alpha} \quad (35)$$

a po úpravě

$$f \geq \frac{\sin \varphi \cdot \cot \alpha}{\cos \delta} + \cos \varphi \cdot \tan \delta \quad (36)$$

Pro válcové děrovací stroje lze rovnici zjednodušit, jelikož úhly sklonů válců k ose děrování a ani úhel δ nebývají velké. V takovém případě je $\cos \delta \doteq 1$ a místo $\tan \delta$ je možno psát $\sin \delta$. Rovněž $\cos \alpha \doteq 1$ a $\cos \varphi \doteq 1$. Za těchto předpokladů dostane rovnice tvar

$$f \geq \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} + \sin \delta \quad (38)$$

Koeficient tření mívá hodnotu $f = 0,2$ až $0,6$, z rovnice vyjadřující podmínky záběru je zřejmé, že záběr bude tím lepší, čím menší bude úhel povrchové přímky děrovacího kužele válců. V takovém případě bude záběr válců spolehlivý i při malém koeficientu tření f . Záběr je rovněž závislý na $\sin \delta$. Malou hodnotu bude mít sinus tohoto úhlu při velkém poměru průměru válců k průměru vstupního materiálu. Proto se u válců velkých průměrů podmínky záběru zlepšují [2].

Při větších úhlech sklonu válců k ose děrování se zvětšuje osová složka rychlosti. To způsobuje zmenšení koeficientu tření. Větší úhel sklonu válců sice zvyšuje předpoklady záběru, ale protože se současně zmenšuje koeficient tření, nemohou se zlepšené podmínky pro záběr zcela uplatnit [1].

Další podmínkou pro plynulé děrování je požadavek, aby se vstupní materiál otáčel a válce po něm neklouzaly. Tato podmínka bude splněna tehdy, bude-li výsledná obvodová síla na vstupním materiálu větší než nula a bude-li její smysl souhlasit se směrem otáčení materiálu. Tuto sílu lze vyjádřit takto:

$$T_3 + N_2 \cdot \sin \alpha \geq N_4 \cdot \cos \alpha \quad (39)$$

$$f \cdot N \cdot \cos \delta \cdot \sin \alpha + N \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha \geq N \cdot \cos \varphi \cdot \sin \delta \cdot \cos \alpha \quad (40)$$

$$f \geq \cos \varphi \cdot \tan \delta - \frac{\sin \varphi \cdot \tan \alpha}{\cos \delta} \quad (41)$$

Aby válce neklouzaly po děrovaném materiálu, musí být splněna podmínka

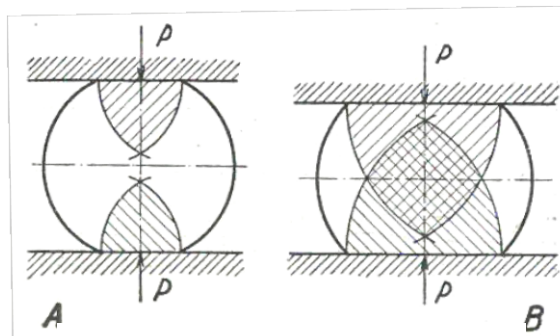
$$f \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \tan \alpha \geq \cos \varphi \cdot \sin \delta \quad (42)$$

2.2.6. Vznik dutiny při kosém válcování; stav napjatosti; poloha děrovacího hrotu

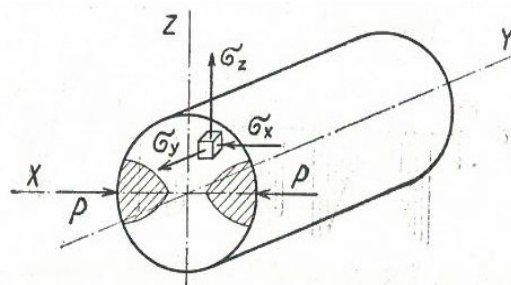
Vznik dutiny lze vysvětlit jako rozrušení středových vrstev válcovaného materiálu vlivem napětí vyvolaných vnějšími silami působícími na tento materiál. V děrovacím pásmu je touto silou příčný tlak děrovacích válců či kotoučů a jejich obvodová síla. Ke konci děrovacího pásma, poblíž roviny průchodu, pak rovněž tlak vyvolaný děrovacím hrotem. Účinek tlaku vodících válců či pravítek je tak malý, že jej můžeme zanedbat. Vnější síly vyvodí v libovolném místě pásma deformace stav prostorové napjatosti, měnící se jak v příčném tak podélném průřezu pásma deformace [1].

Rozhodující vliv na stav napjatosti, a tím i vznik dutiny při kosém válcování má příčný tlak válců, ten se v důsledku otáčení materiálu mezi válci neustále mění. Za půl otáčky sochoru, ingotu či kontislitku, vystřídá příčný tlak všechny možné polohy po celém jejich obvodu. Tento tlak válců vyvolá v materiálu tvárnou deformaci, která je však rozložena pouze po části jeho příčného průřezu. Průběh této deformace lze vysvětlit na příkladu válce vystavenému příčnému tlaku dle obrázku č.11. Z teorie pružně plastických deformací je známo, že se válce plasticky deformují pouze jen v té části průřezu, jenž pod stykovou plochou nástroje a materiálu. Ostatní průřez je namáhán jen v oblasti pružné deformace. Zvětší-li se zatížení, zvětší se rovněž hloubka plochy s plastickou deformací až se plastické účinky vnějších sil setkávají ve středové oblasti průřezu. Na povrchu provalku je tedy pásmo intenzivní plastické deformace a uvnitř zůstává nezdeformované jádro. Tato nerovnoměrnost deformace způsobuje značná vnitřní pnutí, takže stav napjatosti v průřezu provalku způsobuje jak napětí způsobené účinkem vnějších sil, tak také napětí způsobená nerovnoměrností deformace. Pokud tedy chceme vyjádřit tento stav napjatosti, zvolíme souřadnicový systém tak, aby se směr X ztotožňovals tlakem P děrovacích válců a směr Y se směrem děrování; směr Z je pak směr svisly (obrázek č.12). Účinkem tlaku P je v libovolném bodě provalku vyvoláno ve směru osy X tlakové napětí $-\sigma_x$ a ve směru osy Z tahové napětí $+\sigma_z$. Ve směru osy děrování Y působí tahové napětí $+\sigma_y$.

Protože se děrovaný materiál otáčí, dojde k vystřídání povrchových vrstev vystavených intenzivnímu tváření na celém obvodu provalku a směry napětí σ_x , σ_y a σ_z v jednom libovolném bodě průřezu provalku se neustále mění. Výsledná normálová napětí jsou součtem napětí vyvolaných účinkem vnějších sil a nerovnoměrnou deformací. Na vnějším povrchu mohou být jen napětí tlaková, vzhledem k neustálému tváření provalku při jeho otáčení. Ve středových vrstvách naopak vznikají tahová napětí. Považujeme-li zvolené osy souřadnic za osy hlavní, jsou i napětí σ_x , σ_y a σ_z hlavní normálová napětí [1].



Obrázek č. 11 Plastická deformace
válcce vystavená příčnému tlaku



Obrázek č. 12 Stav napjatosti v provačku
způsobený děrovacími válci

Tento stav napjatosti platí pokud neuvažujeme vliv účinku děrovacího hrotu. Ve středových vrstvách jsou tahová napětí ve všech směrech trojosého stavu napjatosti. Tento stav je pro tváření nejméně příznivý, neboť velmi snadno porušuje soudržnost kovu. Děrovací hrot vhodně umístěný v pásmu deformace vnáší do stavu napjatosti tlakový účinek, který ve směrech osy X a Z , ale zejména ve směru osy Y , vyvolá tlaková napětí, která snižují nepříznivá tahová napětí ve středových vrstvách provačku. V extrémních případech lze vyvolat trnem tak vysoká tlaková napětí, že výsledná napětí ve středových vrstvách budou rovněž tlaková. Dutina tak vzniká násilně na trnu a netvoří se samovolně rozrušováním středové části provačku. Tento stav děrování je spojen se značnou spotřebou energie a velkým opotřebením děrovacího trnu [2].

Pro vytvoření dutiny kosým válcováním je rozhodující stav napjatosti vyvolaný tlakem válců, takže je možno zhotovit dutý předvalek i bez použití trnu. Děrovací trn však příznivě působí na stav napjatosti v pásmu deformace a tím podporuje vznik dutiny. Umožňuje rovněž příčné rozválcování a vyhlazuje vnitřní povrch. Správné umístění trnu má zásadní vliv na kvalitu vnitřního povrchu provačku. Pokud dutina vzniká samovolně příliš daleko před špičkou trnu, vznikají na vnitřním povrchu šupiny, okysličením porušeného materiálu vzduchem vnikajícím do dutiny. Okysličený materiál se již při příčném válcování nesvaří. Děrování je tedy nutné řídit tak, aby dutina vznikala těsně před špičkou děrovacího hrotu. Jen tímto způsobem lze zajistit vysokou kvalitu vnitřního povrchu [1].

2. 3. Tvářitelnost oceli

Schopnost kovových těles plasticky se deformovat závisí na metalurgicko-fyzických vlastnostech tvářeného materiálu a současně na vnějších podmínkách tváření. Pro popis těchto vlastností materiálu lze použít tyto základní pojmy:

Plastičnost je schopnost materiálu se plasticky deformovat v daných podmínkách v rozsahu deformací od počátečních do mezní, kdy počáteční plastičnost vyjadřuje přechod od pružného do plastického stavu a mezní plastičnost odpovídá podmínkám vzniku prvních trhlin. Tvářitelnost je potom tedy definována jako schopnost tělesa plasticky se deformovat

za daných určitých podmínek tváření až do porušení soudružnosti materiálu. Závisí tedy na plastičnosti, geometrii tvářeného tělesa a podmínkách tváření [7].

Metalurgická tvařitelnost potom vyjadřuje vliv metalurgických činitelů na tvařitelnost za daných termomechanických podmínek např. teploty, rychlosti deformace aj [8].

2.3.1 Veličiny k popisu rozměrových změn při tváření

Pro popsaní deformace vzhledem k rozměrovým změnám tvářeného tělesa lze použít několik způsobů. Při tváření se tedy mění výška, šířka a délka tvářeného tělesa. Deformaci lze popsat z hodnot těchto rozměrů před a po deformaci těmito způsoby:

a) Absolutní deformací, kterou lze spočítat jako rozdíl rozměru po a před deformací, např. pro změnu délky dle vzorce

$$\Delta l = l_1 - l_0, \quad (43)$$

kde l_1 je rozměr po deformaci a l_0 rozměr původní.

b) Poměrná deformací, kterou lze stanovit jako podíl absolutní deformace k původnímu rozměru. Pro změnu délky tedy dle vzorce

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (44)$$

c) Součinitelem deformace, který lze vyjádřit jako podíl výsledného rozměru k původnímu rozměru. Takto lze stanovit např. koeficient prodloužení λ dle vzorce

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0}. \quad (45)$$

d) Skutečnou (logaritmickou) deformací, která se vyjádří logaritmem součinitele deformace dle vzorce

$$e_l = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \lambda. \quad (46)$$

Při válcování kruhových průřezů využíváme pro výpočty deformací místo výšky a šířky průměr. To by ovšem v případě kosého válcování dutých předvalků rovněž nebylo možné díky vzniku dutiny. Proto pro popis deformace použijeme v experimentální části pro výpočet skutečné deformace změnu příčného průřezu S . Skutečnou deformaci počítáme dle rovnice

$$e_S = \ln \frac{S_1}{S_0}, \quad (47)$$

kde S_0 je plocha příčného průřezu vstupního provalku a S_1 plocha příčného průřezu předvalku (mezikruží). pro stanovení koeficientu prodloužení použijeme standardní výpočet dle rovnice (44) [6, 7].

3. Popis technologického zařízení trati Velký Mannesmann Třineckých železáren

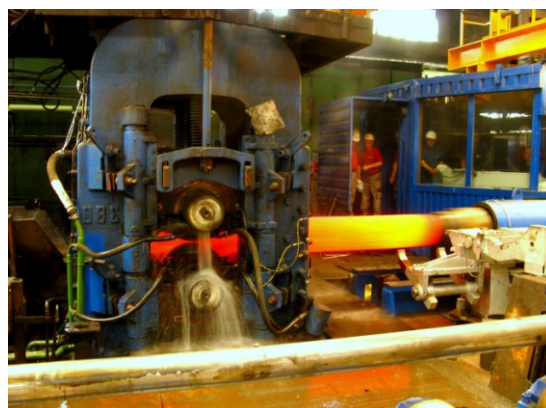
Válcovací trať Velký Mannesmann vyrábí tvářením za tepla ocelové bezešvé trubky poutním válcováním s vnějším průměrem od 168,3 mm do 406,4 mm a tloušťkou stěny 6,3 mm až 63,5 mm. Rozsahy tloušťky stěny jsou omezeny dle vyráběného průměru. Vyrábí se zde trubky z oceli třídy 11 – 17 (oceli uhlíkaté, ušlechtilé, nízko a středně legované). Vstupním materiálem jsou převážně kruhové kontislitky dodávané z Třineckých železáren, vyjimečně potom ingoty nebo sochory. Kruhové kontislitky jsou dodávány v průměrech 320, 410, 470 a 525 mm (průměr 525 mm je na ústupu a již se téměř neválcuje). Kontislitky jsou děleny dle požadovaného rozměru trubky pálením nebo řezáním na potřebnou délku v rozsahu od 650 do 2500 mm.

Ohřev před samotným tvářením probíhá v karuselové peci, kde je vstupní materiál ohříván dle příslušné skupiny ohřevu na tvářecí teplotu. Tvářecí teploty a doby ohřevu jsou stanoveny dle jakostních skupin, do kterých je vstupní materiál rozdělen dle chemického složení. Po výstupu z karuselové pece jsou bloky z důvodu optimalizace počátku děrovacího procesu středěny na důlčikovacím zařízení, do hloubky cca. 30 mm. Blok je následně děrován na děrovacím stroji – viz **obrázek 13**. Děrovací stroj je dvouválcový s horním opěrným válcem, kdy pracovní válce jsou od osy děrování skloněny o 3° a používají se v rozsahu průměru od 640 do 695 mm (průměr v rovině průchodu) při konstantních otáčkách 48 ot.min⁻¹. Opěrný válec se využívá v rozsahu 380 až 440 mm. Pro děrování se dále využívají děrovací trny několika typů a tvarů dle děrovaného materiálu a rozměru v rozsahu průměru 115 až 370 mm.

Vyděrované předvalky dále pokračují na poutnickou stolicí viz **obrázek 14**, kde jsou dále příčně rozválcovány na požadované rozměry před následnou finální kalibrací.



Obr. 13. Děrovací stroj tratě VM.



Obr. 14. Poutní stolice tratě VM.

Pomocí traťové kotoučové pily jsou za tepla obřezány konce poutnických trubek (tzv. hlava a pata), po čemž vstupují trubky na chladník před krokovou pecí. Na chladníku jsou trubky ochlazovány na teplotu 500°C ± 100°C. Následuje ohřev trubek pro kalibraci. Ten je prováděn v krokové peci a dle příslušného rozměru a materiálu jsou zde trubky

ohřívány na 890°C až 980°C a následně kalibrovány ve třístožanové kalibrovací stolici. Před samotnou kalibrací jsou trubky zbaveny povrchových okují pomocí vysokotlakého ostříku okují. V kalibrovací stolici dochází k poslední tvářecí operaci, trubky zde získávají konečný průměr. Dále jsou trubky intenzivně ochlazovány na chladníku za kalibrovací stolici. Ochlazování je řízeno opět dle příslušného materiálu a rozměru trubek. Po dostatečném ochlazení následuje rovnání na šikmoválcové rovnací stolici a přechod na studenou část válcovny, kde jsou trubky následně nedestruktivně zkoušeny, provádí se odběry vzorků pro zkoušky mechanických hodnot a finální řezání, případně pro některé materiály dochází k tepelnému zpracování.

3.1 Parametry děrovacího stroje

Technické údaje		
Děrovací stolice		Inventární číslo : 13817
Typ		Dvou kuželová
Výrobce		DEMAG Duisburg
Rok výroby / rekonstrukce		1917 / 1965
Rozměry pracovních válců	průměr	600 až 700 mm
	délka	2 650,5 mm
	hmotnost válce	3 350 kg
	materiál	VN 19 613.6
	průměr čepů	340 mm
	sklon od osy děrování	3 °
Rozměry opěrného válce	průměr	360 až 440 mm
	délka	2 013 mm
	hmotnost válce	1 420 kg
	materiál	VN 19 613.6
	průměr čepů	220 mm
	sklon od osy děrování	2 °
Děrovací tyče - průměr		100 až 150 mm
Děrovací trny (hroty) - průměr		110 až 370 mm
Rozměry předvalků	průměr	230 až 500 mm
	délka	Maximálně 2 800 mm
	výkon	2 650 kW
Pohon	otáčky motoru	118 min ⁻¹
	otáčky děrovacích válců	48 min ⁻¹

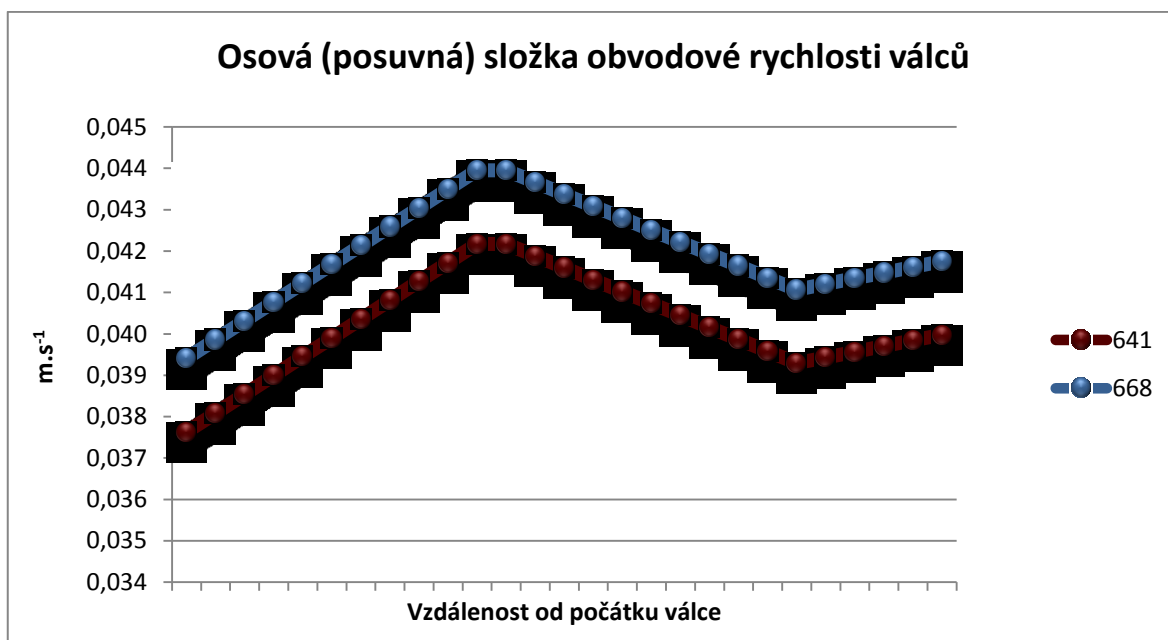
Tabulka s technickými parametry děrovacího stroje VM [9].

4. Experimentální část

4.1 Odběry vzorků a výpočty koeficientů deformace

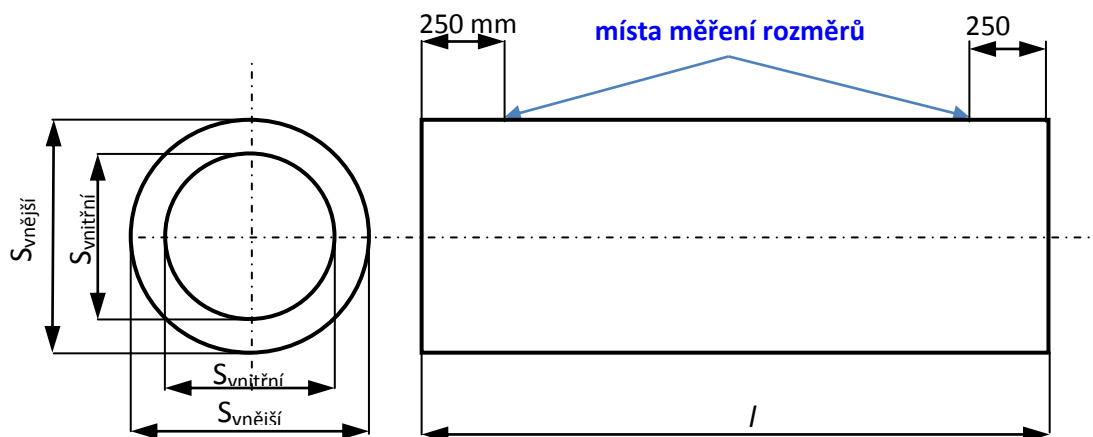
Pro experimentální část jsem volil výběrem několik způsobů děrování vstupních předvalků. Pro možné porovnání vlivů různého průměru vstupní vsázky byly vybrány provalky ze vsázky všech základních používaných průměrů kontisliťků na válcovací trati Velký Mannesmann. Vybrané vzorky byly vždy děrovány jiným způsobem vzhledem k požadovanému výstupnímu rozměru. V experimentální části bude pro každý jednotlivý případ způsobu děrování popsáno chemické složení vzorku, popis způsobu děrování, v tabulkách uvedeny teoretické a skutečné deformace.

Jelikož experiment probíhal při běžné výrobě, došlo rovněž v průběhu pokusů k výměně pracovních děrovacích válců (změně průměru), a tudíž ke změně obvodových rychlostí válců. Srovnání obvodových rychlostí v různých místech pásma deformace jednotlivých válců je zobrazeno v příloženém grafu č.1.



graf č.1 Srovnání osové složky obvodové rychlosti při rozdílných průměrech válců

Pro jednotlivé případy jsem nejprve provedl teoretický výpočet deformací dle předpokládaného výstupního rozměru pro běžné nastavení konkrétního případu děrování a tyto teoretické výpočty se po vyděrování porovnávaly s výpočty deformací s naměřených rozměrů skutečných předvalků. V tabulkách naměřených hodnot pak pro výpočty slouží průměrné hodnoty s náměrů prováděných dle nákresu na obrázku č.15.



Obrázek č.15 Naznačení míst měření provalků

Předvalek z kterého byl odebrán "Vzorek č.1" představuje rozšiřování vsázky průměru 320 mm na děrovacím hrotu průměru 240 mm pro válcování průměru 245 mm. Vzorek je z materiálu S335J2H z tavby T64389 o chemickém složení dle tabulky č. 1.

Tab č.1- chemické složení tavby T64389

Ceq	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0,41	0,169	1,17	0,19	0,015	0,006	0,05	0,03	0,17	0,008	0,032
Ti	Alc	W	Nb	B	N	Sn	H	As	Co	Sb
0,001	0,029	0,01	0,001	0,0003	0,0093	0,004	0	0,002	0,004	0,003

Pro vzorek č.1 jsou uvedené výsledné hodnoty v tabulce č.2. Výsledky výpočtů s indexem t jsou teoretické výpočty pro předpokládaný předvalek. Výsledky výpočtů bez indexu pak výsledky ze skutečně naměřených hodnot na skutečných předvalcích.

Tab.č.2- Teoretické a skutečné rozměry a deformace vzorku č.1

Vzorek č.1	původní		S_{konti}	$S_{tpřed}$	teoretický předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ_t	e_t	ε_t
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	320	850	80424,8	40290,9	330	240	1656	1,95	0,691	1,996
	původní		S_{konti}	$S_{před}$	skutečný předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ	e	ε
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	320	850	80424,8	34113,8	334	261	1845	2,17	0,858	2,358

Druhý předvalek je rovněž z jakosti S355J2H z tavby T63374. Z hlediska poměru vstupního k výstupnímu rozměru se jedná o úžení materiálu na děrovacím hrotu průměru 165 mm. Tento předvalek byl vyráběn pro válcování v kalibru 181 mm pro finální trubku průměru 168 mm. Předpokládané zúžení na průměr 280 mm, dle provedeného nastavení bylo ještě překročeno a došlo tedy k větší deformaci. Porovnání předpokládaných a
Jurča R., *Vliv vstupního rozměru polotovaru na tvaritelnost při děrování na VM*. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava, 2014.

skutečných deformací i koeficientů prodloužení je rovněž patrné z následujících tabulek. V první tabulce je uvedeno rovněž chemické složení tavby. Vzorce pro výpočty jsou totožné, jako u vzorku č.1.

Tab č.3 - chemické složení tavby T63374

Ceq	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0,41	0,174	1,15	0,19	0,015	0,006	0,04	0,03	0,17	0,011	0,03
Ti	Alc	W	Nb	B	N	Sn	H	As	Co	Sb
0,001	0,026	0,01	0,001	0,0004	0,0103	0,003	0,00018	0,002	0,004	0,002

Tab č.4- Teoretické a skutečné rozměry a deformace vzorku č.2

Vzorek č.2	původní		S_{konti}	$S_{tpřed}$	teoretický předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ_t	e_t	ε_t
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	320	650	80424,8	40192,8	280	165	1269	1,95	0,694	2,001
	původní		S_{konti}	$S_{před}$	skutečný předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ	e	ε
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	320	650	80424,8	31661,8	267	176	1585	2,44	0,932	2,540

Jak jsem již uvedl v předchozím textu, došlo během výběru vzorků k experimentu k výměně pracovních válců děrovací stolice. Proto je třetí předvalek rovněž odebrán z podobného případu jako druhý, tzn. úžení vsázky průměru 320 mm na rozměr cca 280 mm. Při porovnávání výsledků děrování v těchto případech bude posuzován vliv rozměrů válců. To samozřejmě znamená různé obvodové rychlosti válců, které při konstantních otáčkách mění podmínky pro tváření. Tavba byla v těchto dvou případech totožná tzn. T63374 a její chemické složení je tedy uvedeno v tabulce č.3.

Tab č.5 - Teoretické a skutečné rozměry a deformace vzorku č.3

Vzorek č.3	původní		S_{konti}	$S_{tpřed}$	teoretický předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ_t	e_t	ε_t
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	320	1070	80424,8	42706,0	280	155	1966	1,84	0,633	1,883
	původní		S_{konti}	$S_{před}$	skutečný předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ	e	ε
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	320	1070	80424,8	34928,2	269	167	2300	2,15	0,834	2,303

Předpokládal jsem tedy při obdobném úhlovém nastavení děrovacího stroje, téměř totožné výsledky deformací a koeficientu prodloužení, což se v tomto případě nepotvrdilo. Změna obvodové rychlosti válců tedy ovlivnila výsledky deformací.

Dalším zkoumaným případem bylo děrování vsázky průměru 410 mm na děrovacím trnu průměru 310 mm, kdy podle teoretických předpokladů nemělo dojít k významné změně vnějšího průměru. Tento předpoklad se téměř potvrdil, pouze vnitřní rozměr předvalku se po vypočtení průměrné hodnoty výrazně lišil od teoretického předpokladu. Při použitém nastavení děrovací stolice měl vyrovnávací kužel děrovacích válců zajistit nižší vnitřní průměr předvalku. K takto významnému nárůstu vnitřního průměru došlo zřejmě z důvodu nastavení polohy děrovacího trnu, kdy děrovací hrot byl umístěn více vpředu tzn. že špička děrovacího trnu byla umístěna před rovinou průchodu. V následných tabulkách č. 6 a 7 jsou opět uvedeny chemické složení použité tavby, rozměry předvalku a výsledné výpočty deformací.

Tab č.6 - chemické složení tavby T63374

Ceq	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0,42	0,175	1,16	0,19	0,012	0,005	0,04	0,04	0,17	0,01	0,036
Ti	Alc	W	Nb	B	N	Sn	H	As	Co	Sb
0,001	0,029	0,01	0,001	0,0003	0,0096	0,004	0	0,002	0,004	0,003

Tab č.7 - Teoretické a skutečné rozměry a deformace vzorku č.4

Vzorek č.4	původní		S _{konti}	S _{tpřed}	teoretický předvlek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ _t	e _t	ε _t
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	410	1020	132025,4	56548,7	410	310	2307	2,26	0,848	2,335
	původní		S _{konti}	S _{před}	skutečný předvlek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ	e	ε
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	410	1020	132025,4	44591,0	416	341	2650	2,60	1,085	2,961

Další vzorek byl odebrán z vsázky průměru 470 mm z tavby T10203 (Tabulka č.8). Tato se zejména využívá pro výrobu největších rozměrů trubek a převážně se děruje na hrotech velkých průměrů. Vzorek č. 5 byl děrován na děrovacím hrotu φ 340 mm. I v tomto případě jsem při měření hotového předvalku naměřil zejména v patní části předvalku značně větší vnitřní průměr než jsem předpokládal. Hodnoty měření jsou uvedeny v tabulce č.9. Z naměřených a vypočtených hodnot jsou patrné právě značné rozdíly předpokládaných a skutečných rozměrů předvalku a rovněž u koeficientů změny příčného průřezu i koeficientu prodloužení.

Tab č.8 - chemické složení tavby T10203

Ceq	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0,42	0,179	1,17	0,19	0,011	0,007	0,03	0,03	0,17	0,007	0,038
Ti	Alc	W	Nb	B	N	Sn	H	As	Co	Sb
0,001	0,03	0,01	0,001	0,0003	0,0091	0,003	0	0,002	0,004	0,002

Tab č.9 - Teoretické a skutečné rozměry a deformace vzorku č.5

Vzorek č.5	původní		S_{konti}	$S_{tpřed}$	teoretický předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ_t	e_t	ε_t
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	470	1550	173494,5	90163,7	480	340	2943	1,90	0,655	1,924
	původní		S_{konti}	$S_{před}$	skutečný předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ	e	ε
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	470	1550	173494,5	78127,5	490	375	3116	2,01	0,798	2,221

Následující vzorek byl odebrán s předvalem vyrobeného z vsázky ϕ 410 mm tavby T11465, úžením na předpokládaný vnější ϕ 380 mm. To znamená se značnou změnou vnějšího průměru. Z naměřených hodnot je zřejmé, dosažení větší než předpokládané deformace, jelikož naměřený průměr po děrování byl ještě nižší. To vše bez vzniku povrchových vad.

Tab č.10 - chemické složení tavby T11465

Ceq	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0,41	0,173	1,16	0,19	0,013	0,006	0,04	0,03	0,17	0,008	0,034
Ti	Alc	W	Nb	B	N	Sn	H	As	Co	Sb
0,001	0,027	0,01	0,001	0,0003	0,01	0,004	0	0,002	0,003	0,003

Tab č.11 - Teoretické a skutečné rozměry a deformace vzorku č.6

Vzorek č.6	původní		S_{konti}	$S_{tpřed}$	teoretický předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ_t	e_t	ε_t
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	410	1100	132025,4	73650,7	380	225	1910	1,74	0,584	1,793
	původní		S_{konti}	$S_{před}$	skutečný předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ	e	ε
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	410	1100	132025,4	52477,9	361	252	2448	2,23	0,923	2,516

Vzorek č.7 byl odebrán z vsázky ϕ 470 mm po změně průměru pracovních děrovacích válců. Rozměrové parametry a chemické složení je uvedeno v tabulkách č.12 a 13.

Tab č.12 - chemické složení tavby T10198

Ceq	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0,42	0,175	1,16	0,2	0,014	0,007	0,04	0,02	0,17	0,007	0,037
Ti	Alc	W	Nb	B	N	Sn	H	As	Co	Sb
0,001	0,028	0,01	0,001	0,0003	0,009	0,004	0	0,003	0,004	0,003

Tab č.13 - Teoretické a skutečné rozměry a deformace vzorku č.7

Vzorek č.7	původní		S_{konti}	$S_{tpřed}$	teoretický předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ_t	e_t	ε_t
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	470	1380	173494,5	79168,1	480	360	2985	2,16	0,785	2,191
	původní		S_{konti}	$S_{před}$	skutečný předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ	e	ε
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	470	1380	173494,5	77408,8	496	384	3120	2,26	0,807	2,241

Posledním vzorkem odebraným v rámci experimentu byl vzorek z vsázky ϕ 410 mm z tavby T56746. Vzorek z tohoto předvalku byl následně postoupen pro EBSD analýzu.

Tab č.12 - chemické složení tavby T56746

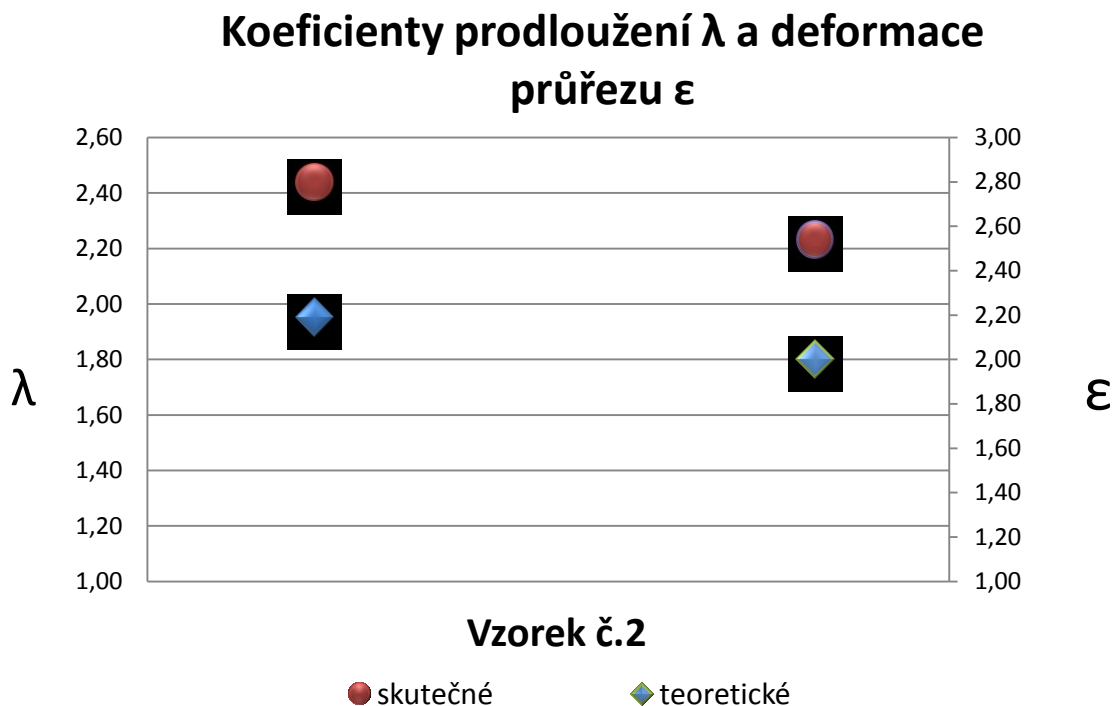
Ceq	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0,42	0,179	1,18	0,2	0,015	0,007	0,03	0,03	0,17	0,009	0,035
Ti	Alc	W	Nb	B	N	Sn	H	As	Co	Sb
0,001	0,029	0,01	0,001	0,0003	0,009	0,003	0,00005	0,004	0,003	0,002

Tab č.13 - Teoretické a skutečné rozměry a deformace vzorku č.8

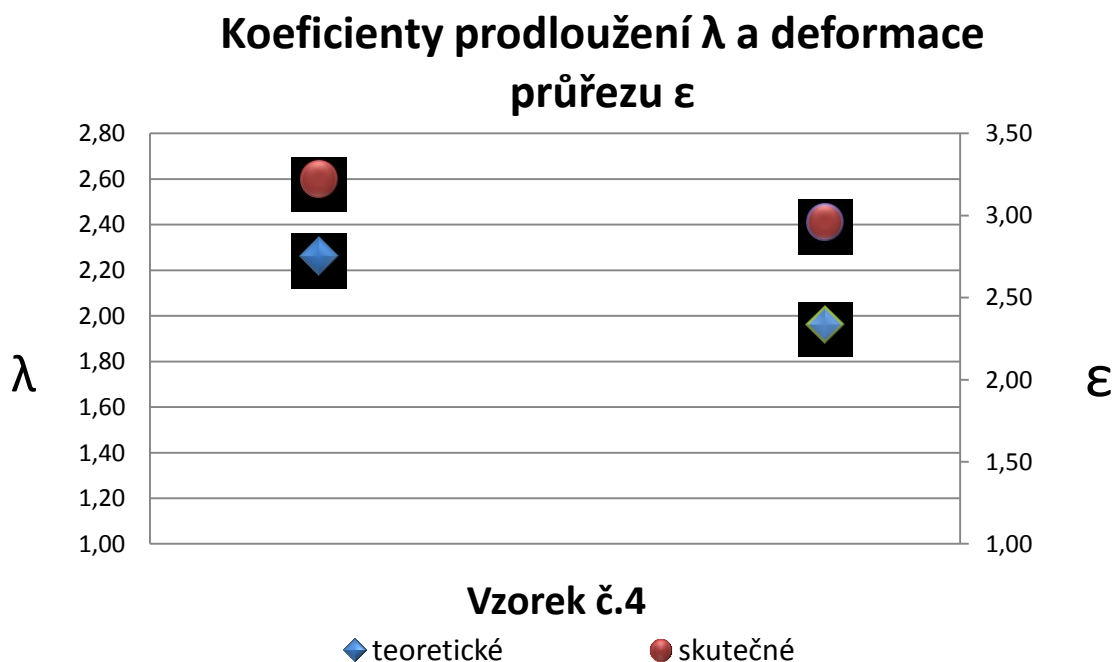
Vzorek č.8	původní		S_{konti}	$S_{tpřed}$	teoretický předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ_t	e_t	ε_t
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	410	1410	132025,4	74534,3	410	300	2419	1,72	0,572	1,771
	původní		S_{konti}	$S_{před}$	skutečný předvalek					
	průměr	délka			průměr vnější	průměr vnitřní	délka	λ	e	ε
	mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	-	-	-
	410	1410	132025,4	44591,0	425	312	2863	1,96	0,702	2,018

Ve všech případech byly dosažené skutečné deformace vyšší než teoreticky vypočítané. Grafické znázornění teoretických a skutečných deformačních koeficientů je zobrazeno v grafu č.2(vzorek č. 2) a grafu č.3(vzorek č. 4) To je způsobeno zřejmě odhadem předpokládaných rozměrů teoretických předvalků a rovněž způsobem vyhodnocení rozměrů konečných skutečných předvalků. Rozměry jsou počítány jako průměrné hodnoty ze čtyř nebo osmi naměřených hodnot. Skutečné rozměry předvalku jsou značně nerovnoměrné a zejména určení vnitřního průměru předvalku je značně nepřesné. Výrazné překročení vnitřního průměru oproti průměru děrovacího hrotu se projevuje zejména v patní části předvalků, je zachováno téměř po celé délce, pouze část předvalku na konci děrovacího procesu se rozměrem dutiny blíží k rozměru použitého

děrovacího hrotu. Tento jev je zřejmě způsoben tvarem kalibrace děrovacích válců a jejich úhlovému nastavení při jednotlivých způsobech děrování.



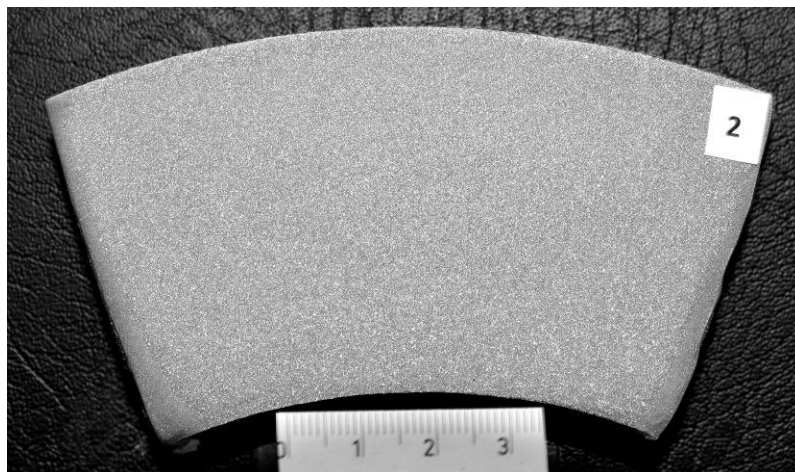
graf č. 2 Znázornění rozdílu teoretických a skutečných koeficientů deformace pro vzorek č.2



graf č. 3 Znázornění rozdílu teoretických a skutečných koeficientů deformace pro vzorek č.4

4.2 Hodnocení makro a mikrostruktury

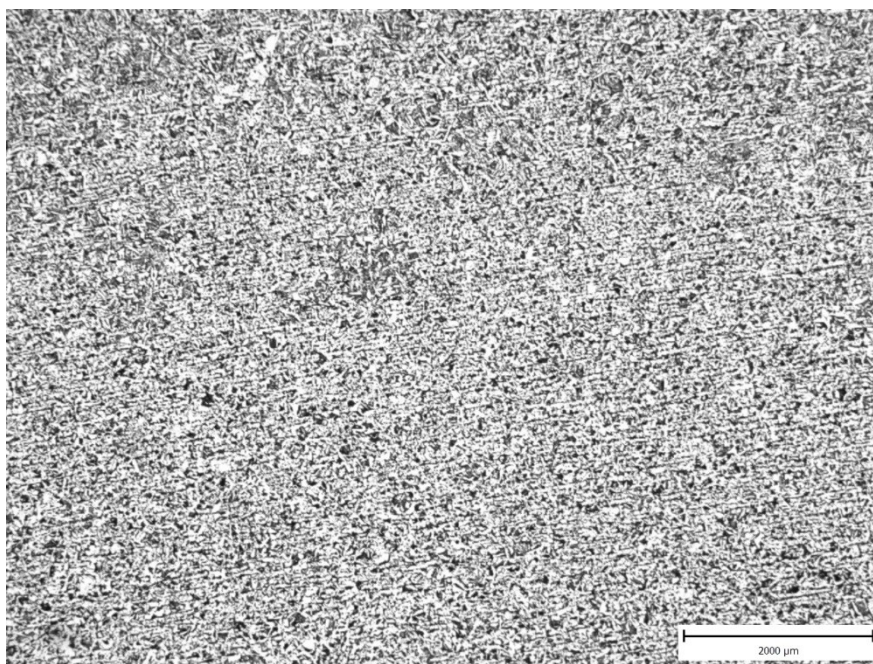
Z vzorků č. 1 až 7 byly provedeny odběry pro hodnocení makro a mikrostruktury. Odběry byly provedeny v podélném směru a to vždy na vnějším a vnitřním povrchu. U vzorku č. 5 pak navíc proveden rovněž odběr v příčném směru. Na obrázku č.15 je příklad makrostruktury. Makrostruktura všech vzorků byla v zásadě homogenní, jemnozrná, bez výraznějších anomálií.



Obr. 15 - Makrostruktura vzorku 2

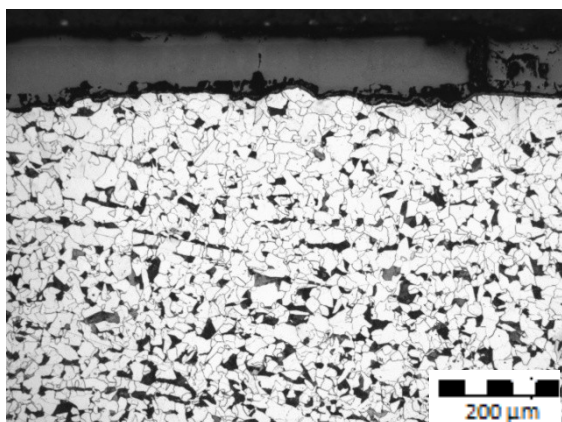
Při odběru vzorků pro mikrostrukturu byly vzorky značeny následujícím způsobem a to vzorek u vnějšího povrchu značen pouze číslem vzorku např. "1" a vzorky u vnitřního povrchu pak číslem vzorku a písmenem "U" v případě vzorku č. 1 tedy "1U".

Hodnocení mikrostruktury vzorku č. 1

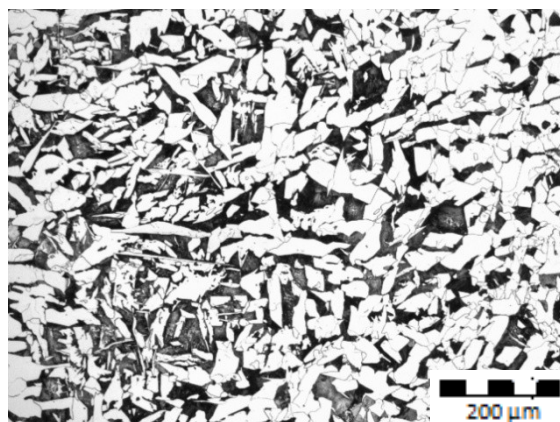


Obr. 16 Vzorek 1, vzdálenost od povrchu do hloubky cca 13,5 mm zv.12,5x

Celkový pohled na vzorek 1, odebraný z vnějšího povrchu trubky, je dokumentován na obr. 16. Mikrostruktura pod vnějším povrchem byla poměrně rovnoměrná, ve větší vzdálenosti od povrchu se lokálně vyskytovaly hrubší, nepravidelné bloky.

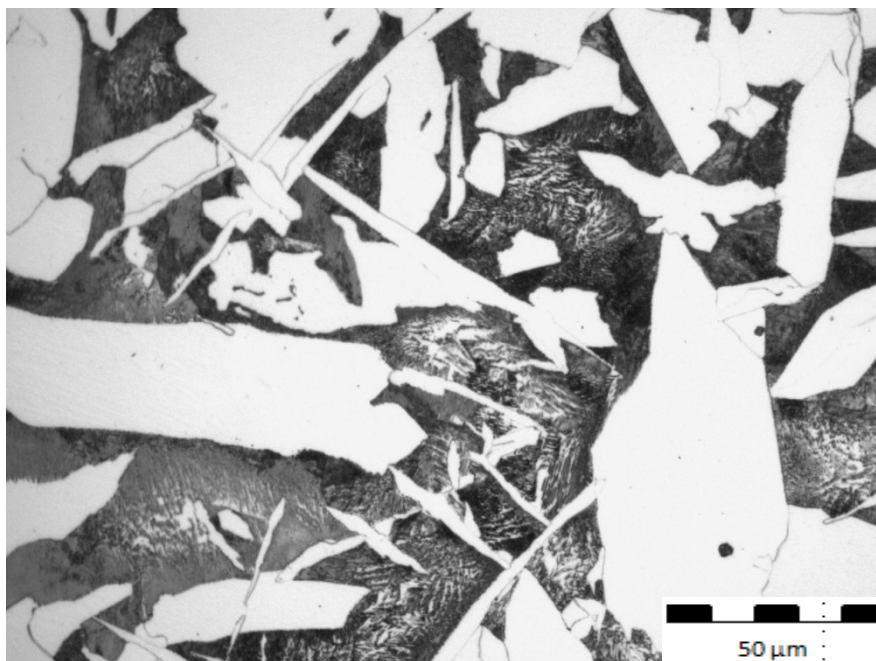


Obr. 16 Vz. 1, podpovrchová oblast zv.100x



Obr. 17 Vz. 1, oblast s hrubšími bloky zv.100 x

Mikrostruktura dodaného vzorku byla tvořena směsí feritu a perlitu. Podél vnějšího povrchu byla zjištěna souvislá oxidická vrstva tloušťky cca 0,18 mm, mikrostruktura jevila známky částečné oduhličené, které zasahovalo do hloubky max. 0,15 mm (obr.č17). V lokálně se vyskytujících hrubších blocích byly mimo ferit a perlit zjištěny rovněž jehlicovité útvary feritu, zobrazeny na obrázcích č. 18 a 19.



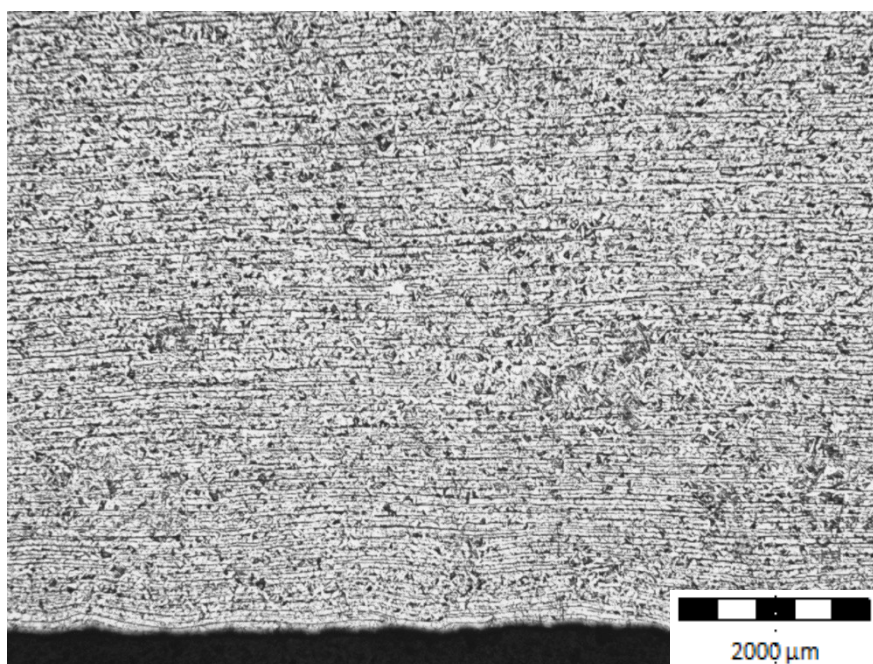
Obr. 19 Vzorek 1, oblast s hrubšími bloky

zv.500x

Vzorek 1U

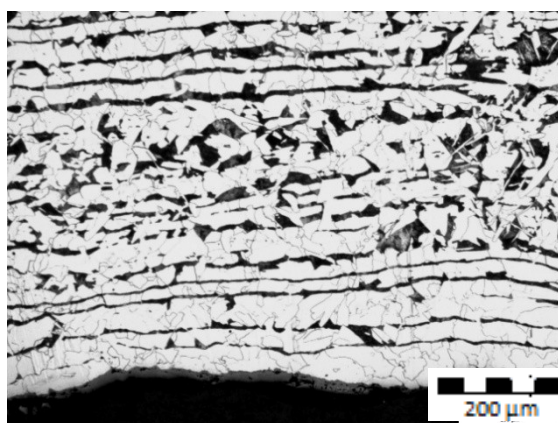
Mikrostruktura vzorku 1U (vnitřní povrch) je dokumentována na snímcích 20 - 22. Struktura vykazuje řádkovitost, lokálně byl zjištěn výskyt hrubších, nepravidelných bloků. Podél vnitřního povrchu byla zjištěna souvislá oxidická vrstva tloušťky max. 0,07 mm a nevýrazné částečné oduhličené do hloubky cca 0,20 mm, obr. 21. Mikrostruktura pod

vnitřním povrchem vykazovala řádkovitost, byla feriticko- perlitická, hrubší feriticko- perlitické bloky s přítomností jehlicovitého feritu jsou dokumentovány na obr.22.



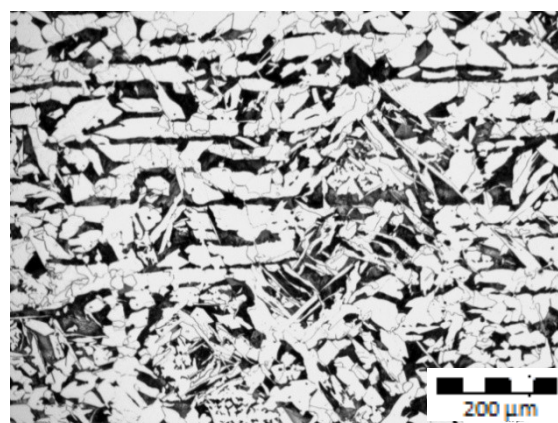
Obr. 20 Vzorek 1U, celkový pohled

zv.12,5x



Obr. 21 Vzorek 1U, vnitřní povrch

zv.100x

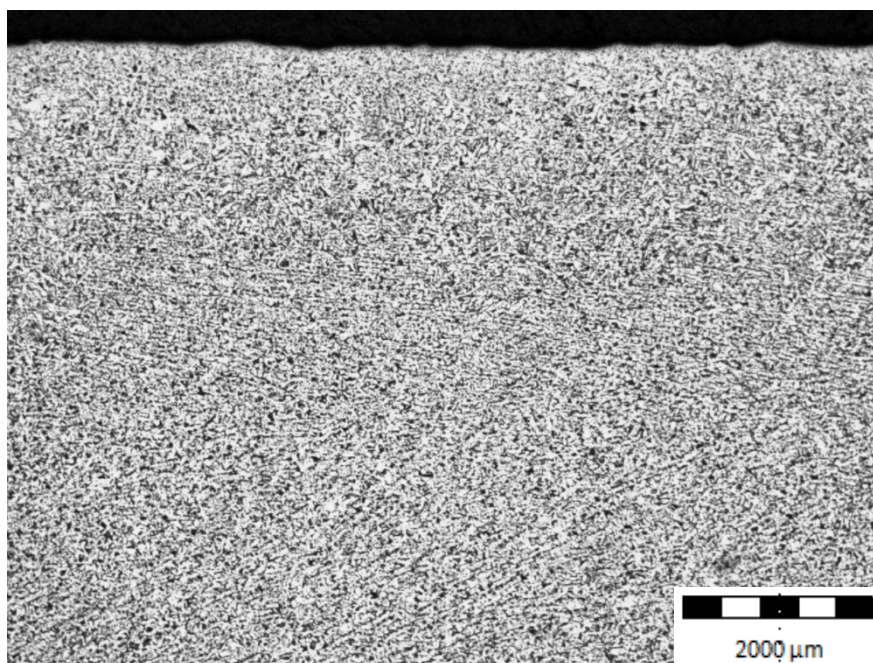


Obr. 22 Vzorek 1U, hrubší bloky

zv.100x

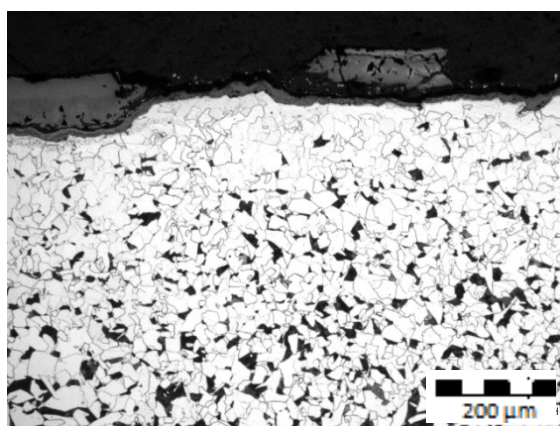
Vzorek 2

Celkový pohled na vzorek 2, odebraný pod vnějším povrchem, je dokumentován na obr. 23. Mikrostruktura byla v zásadě rovnoměrná, tvořená směsí feritu a perlitu. Podél vnějšího povrchu byla zaznamenána souvislá nerovnoměrná oxidická vrstva o tloušťce max. 0,14 mm (obr. 24). Oduhličení zasahovalo do hloubky cca 0,15 mm. Oblast s hrubšími bloky zrn (obr. 25)



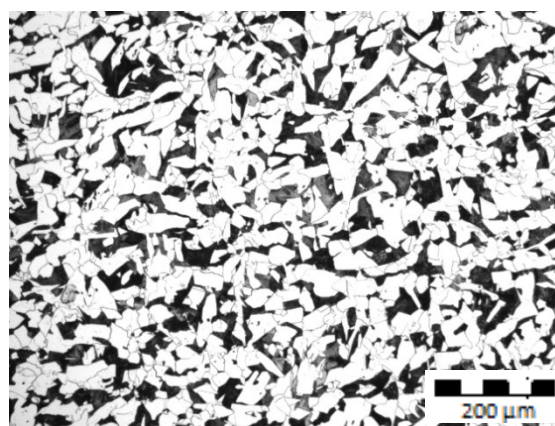
Obr.23 Vzorek 2, celkový pohled

zv.12,5x



Obr. 24 Vzorek 2, vnější povrch

zv.100x

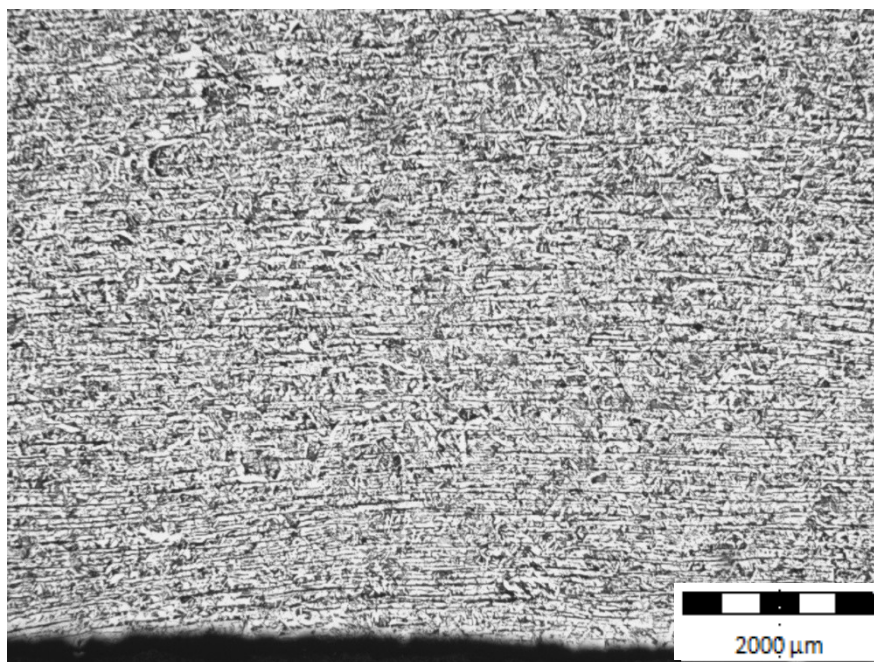


Obr. 25 Vzorek 2, hloubka cca 13 mm pod povrchem

zv.100x

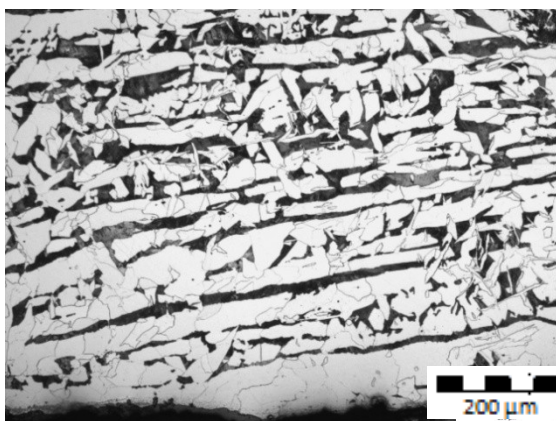
Vzorek 2U

Celkový pohled na vzorek 2U, odebraný z oblasti vnitřního povrchu, je dokumentován na obr. 26. Pozorovaná mikrostruktura vykazovala známky řádkovitosti, oproti vzorku 2 se jevila nepatrně hrubší. Podél vnitřního povrchu byla pozorována oxidická vrstva o tloušťce cca 0,05 mm, částečné lokální oduhličení zasahovalo do hloubky cca 0,15 mm, obr. 27. Ve struktuře se lokálně mimo zrn feritu vyskytují i jehlicovité útvary feritu, obr. 28,29.

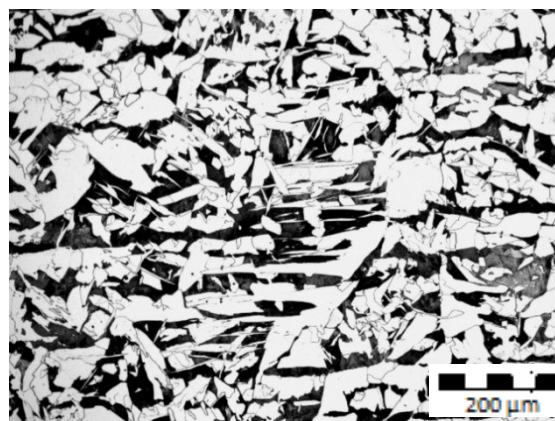


Obr. 26 Vzorek 2U, celkový pohled

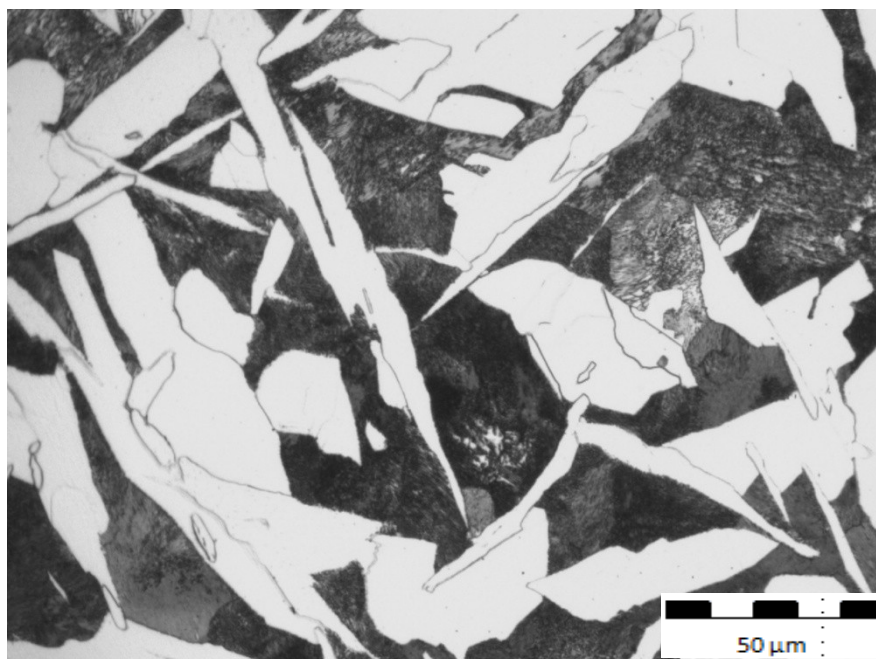
zv.12,5x



Obr. 27 Vzorek 2U, vnitřní povrch zv.100x



Obr. 28 Vzorek 2U, cca 6 mm pod povrchem
zv.100x



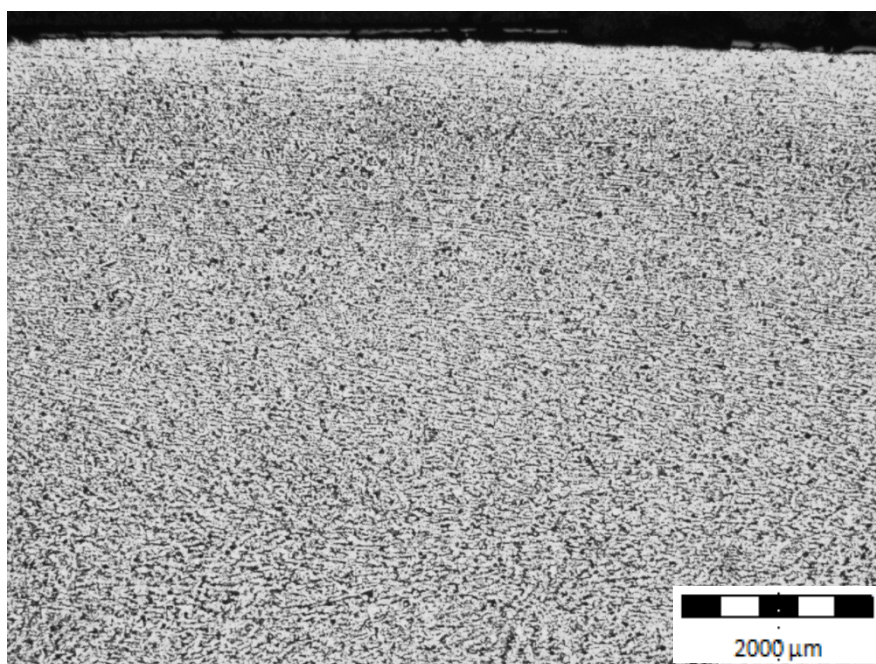
Obr. 29 Vzorek 2U, oblast s jehlicovitým feritem

zv. 500x

Vzorek 3

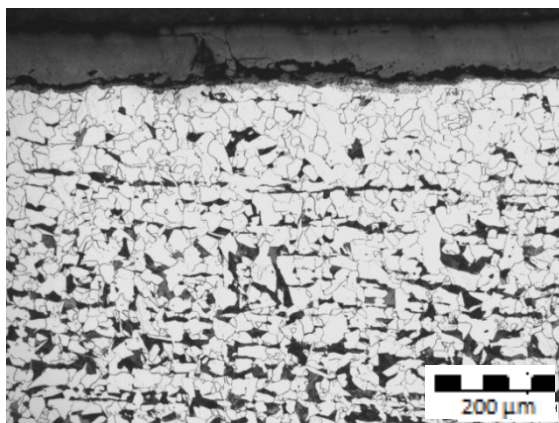
Přehledné zvětšení vzorku 3 je uvedeno na obr. 30. V podpovrchové oblasti bylo patrné oduhličení, mikrostruktura byla jemnozrnná, nevykazovala známky výraznější heterogenity.

K vnějšímu povrchu přiléhala oxidická vrstva o tloušťce max. 0,16 mm. Částečné oduhličení zasahovalo do hloubky max. 0,30 mm. V podpovrchové oblasti byl pozorován náznak řádkovitostí. Mikrostruktura vzorku byla tvořena směsí feritu a perlitu, obr. 31,32.

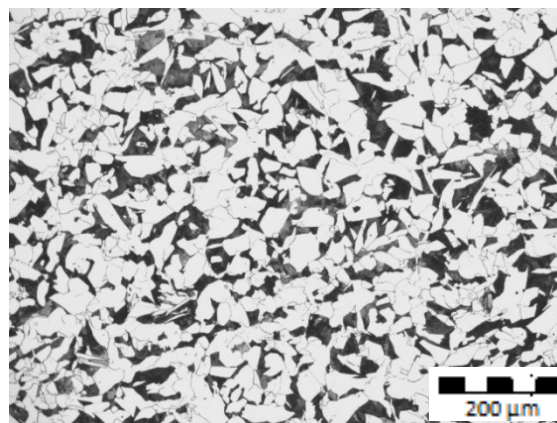


Obr. 30 Vzorek 3, celkový pohled

zv. 12,5x



Obr. 31 Vzorek 3, vnější povrch zv.100x

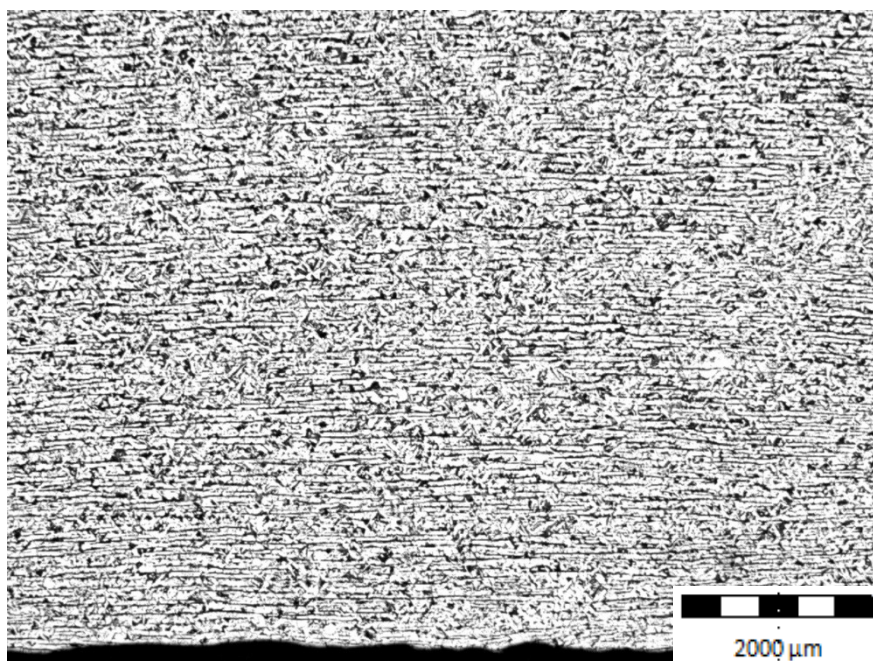


Obr. 32 Vzorek 3, mikrostruktura zv.100x

Vzorek 3U

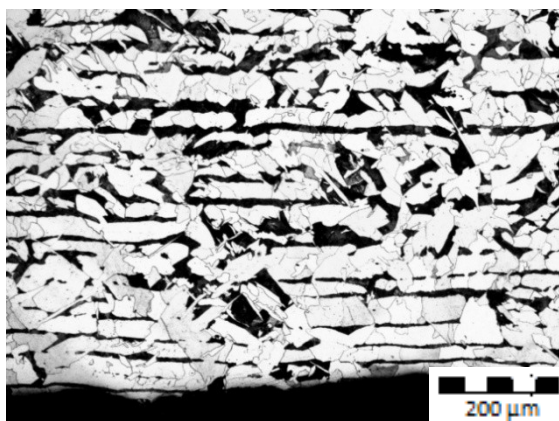
Vzorek 3U, odebraný z vnitřního povrchu trubky 3, je dokumentován na obr.33. Mikrostruktura zejména pod vnitřním povrchem vykazuje řádkovité uspořádání, ve srovnání se vzorkem 3 se jeví mírně hrubší.

Pod vnitřním povrchem byla lokálně zjištěna oxidická vrstva dosahující až 0,16 mm. Mimo perlit a zrn feritu byly lokálně ve struktuře pozorovány rovněž jehlicovité útvary feritu, obr. 34-37. Jak dokumentuje snímek č. 37, byly ve struktuře zjištěny pozůstatky hranic pravděpodobně původního austenitického zrna – viz označení šipkami.

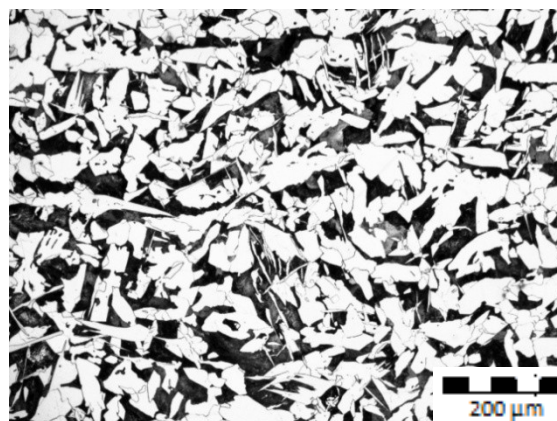


Obr. 33 Vzorek 3U

zv.12,5x

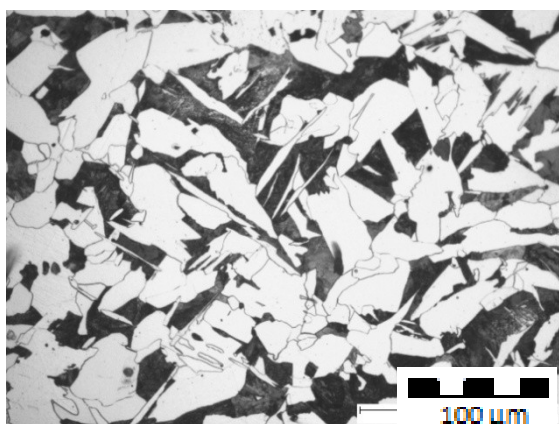


Obr. 34 Vzorek 3U, podpovrchová oblast zv.100x



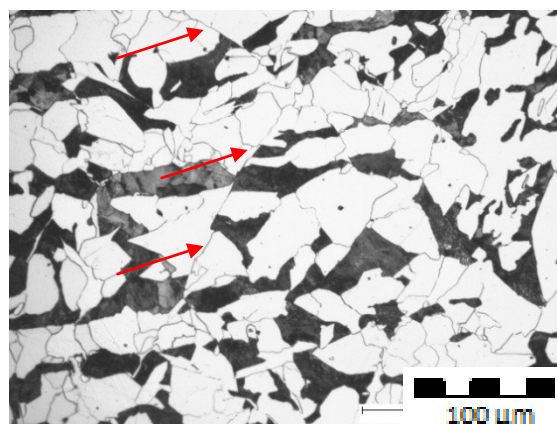
Obr. 35 Vzorek 3U

zv.100x



Obr. 36 Vzorek 3U

zv.200x



Obr. 37 Vzorek 3U

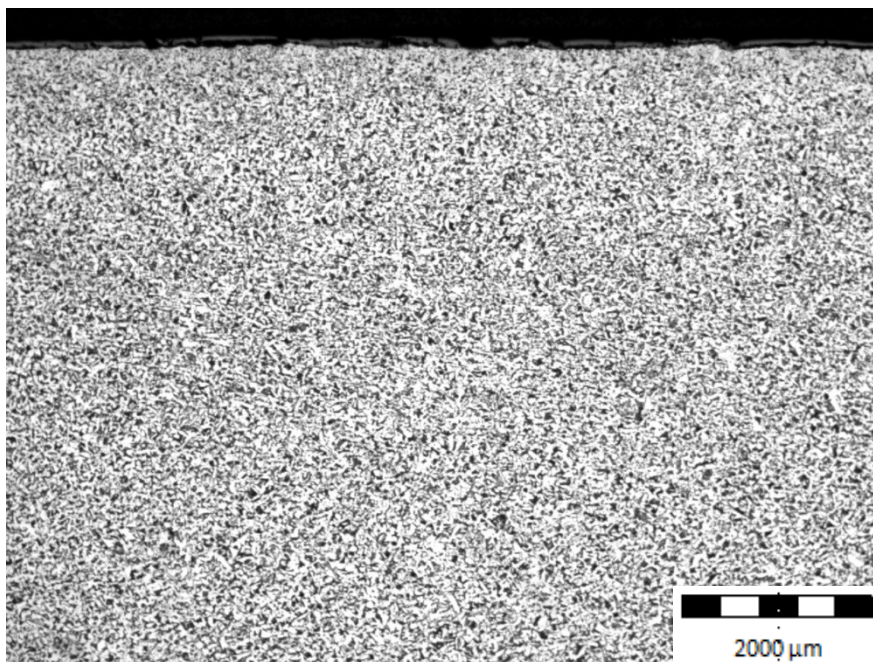
zv.200x

Vzorek 4

Celkový pohled na vzorek 4, je uveden na obr. 38. Mikrostruktura byla poměrně rovnoměrná, ve větší vzdálenosti od povrchu byly zjištěny známky řádkovitosti, obr. 39.

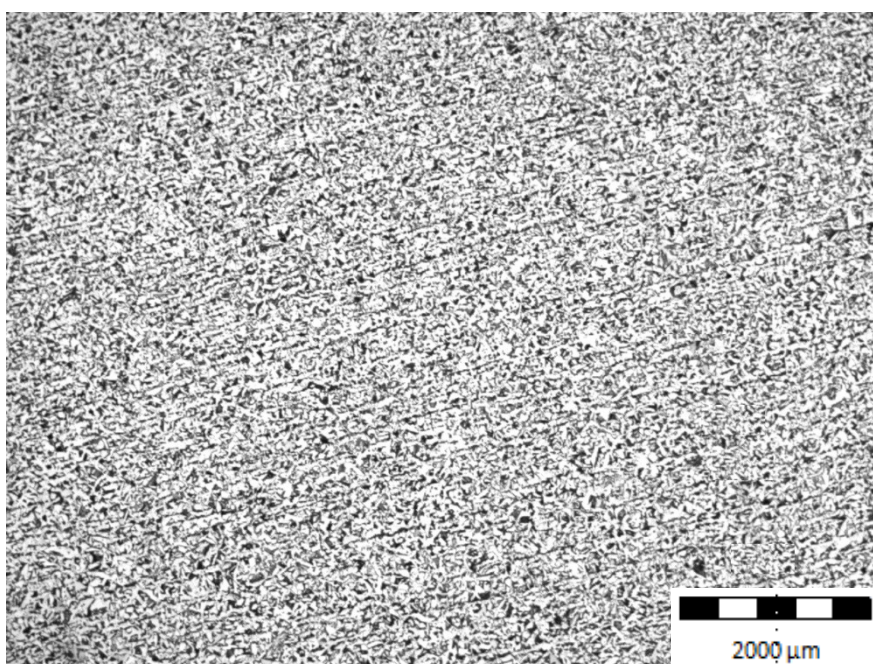
Podél vnějšího povrchu byla pozorována souvislá oxidická vrstva o tloušťce max. 0,20 mm, nepatrné částečné oduhličení zasahovalo do hloubky cca 0,10 mm, obr. 40.

Mikrostruktura byla tvořena směsí feritu a perlitu, v malém množství se ve struktuře vyskytovaly jehlicovité útvary feritu, obr. 41, 42.



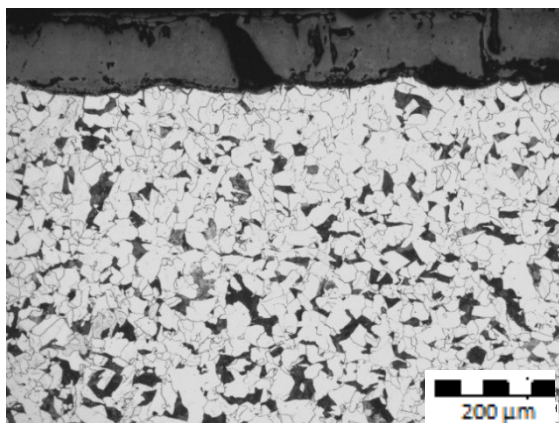
Obr. 38 Vzorek 4

zv.12,5x

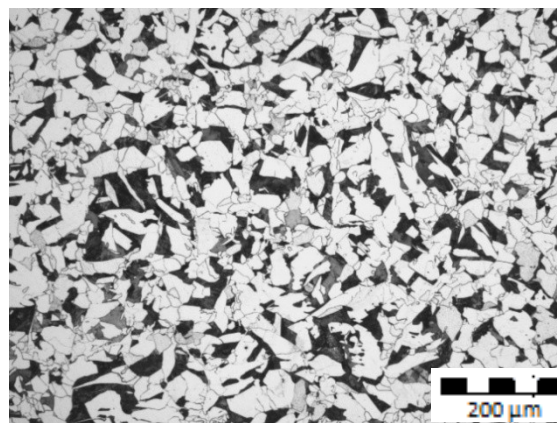


Obr. 39 Vzorek 4, známky řádkovitosti

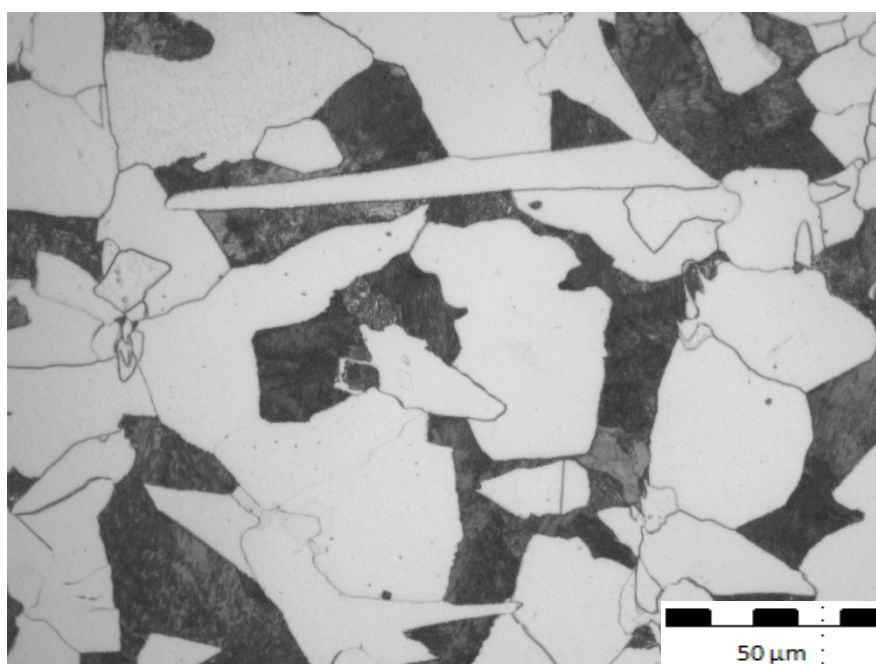
zv.12,5x



Obr. 40 Vzorek 4, podpovrchová oblast zv.100x



Obr. 41 Vzorek 4, mikrostruktura zv.100x



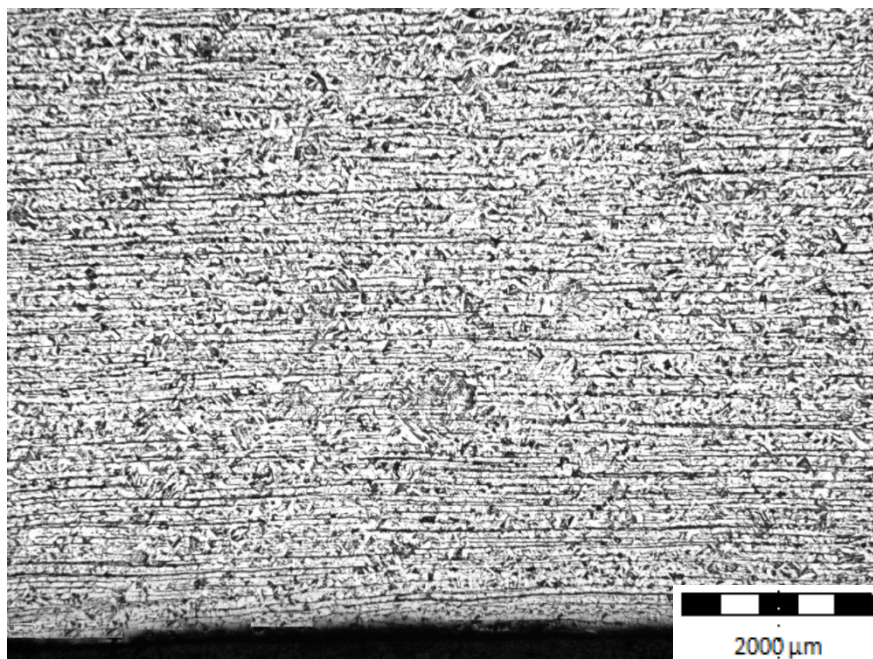
Obr. 42 Vzorek 4, jehlice feritu

zv.500x

Vzorek 4U

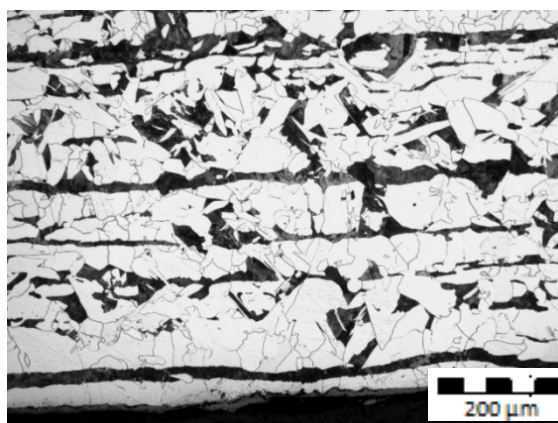
Celkový pohled na vzorek 4U je dokumentován na obr. 43. Mikrostruktura pod vnějším povrchem vykazovala známky řádkovitosti, lokálně se ve struktuře vyskytovaly hrubší bloky. Ve srovnání se vzorkem 4 se mikrostruktura vzorku odebraného z vnitřního povrchu jevila mírně hrubší.

Podél vnitřního povrchu byla zjištěna souvislá nerovnoměrná oxidická vrstva o tloušťce max. 0,08 mm, obr. 44. Částečné oduhličení struktury pod vnitřním povrchem nebylo průkazné, lokálně se jevilo do hloubky cca 0,15 mm. Mikrostruktura byla tvořena směsí feritu a perlitu, v hrubých blocích byly často zjištěny jehlicovité útvary feritu, obr. 45 až 47.

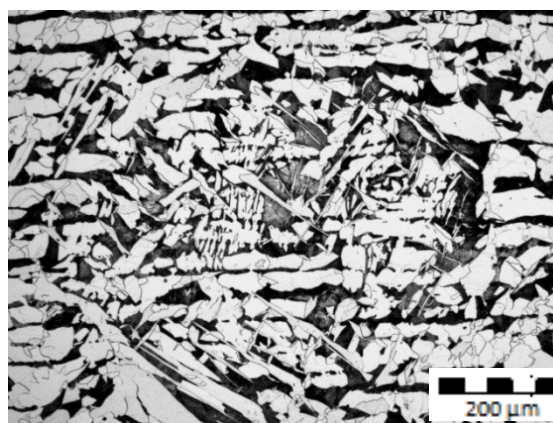
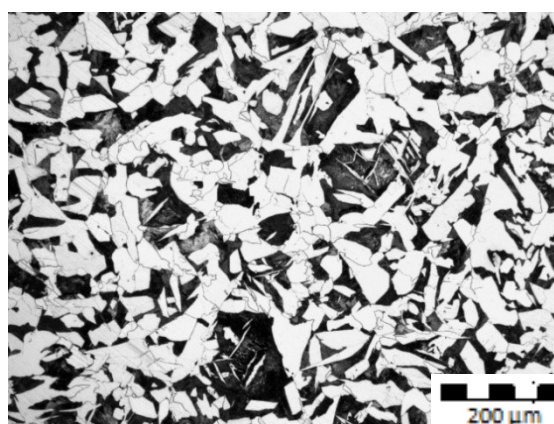


Obr.44 Vzorek 4U

zv.12,5



Obr. 45 Vzorek 4U, podpovrchová oblast zv.100x

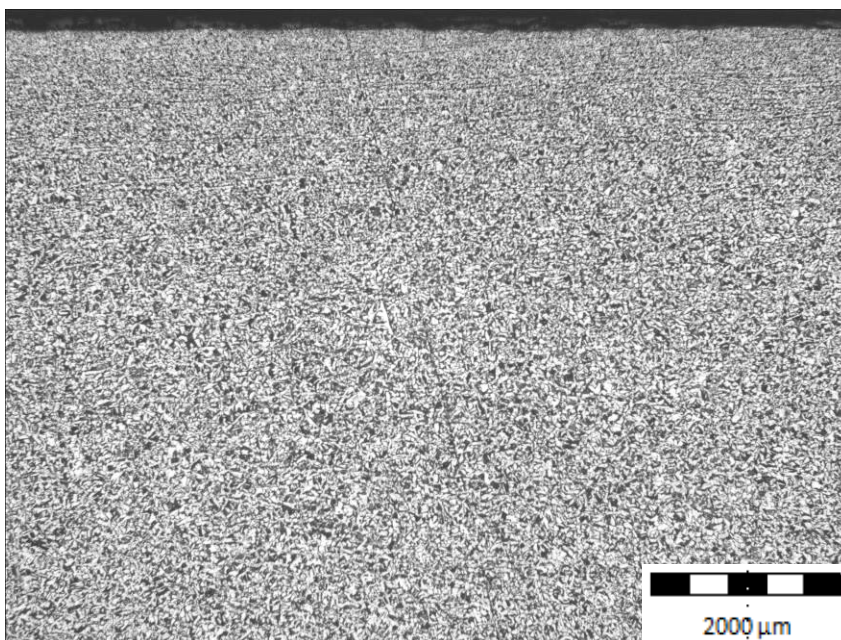
Obr. 46 Vzorek 4U, hloubka cca 2 mm pod povrchem
zv.100x

Obr. 47 Vzorek 4U mikrostruktura

zv.100x

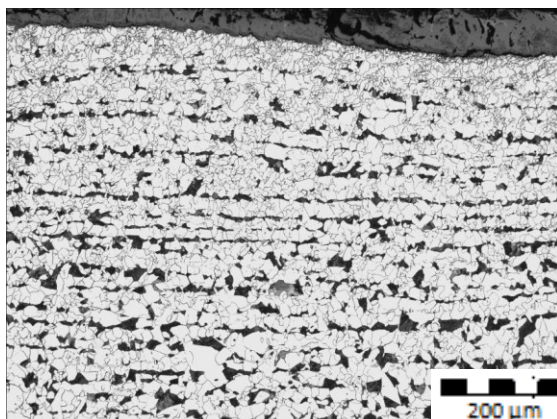
Vzorek 5, 5U, 5P 5PU

Typická mikrostruktura hodnocených vzorků předvalku č. 5 je uvedena na obrázcích 48 až 59. Mikrostruktura matrice v blízkosti vnějšího povrchu se skládala z rovnoosých zrn feritu a lamelárních ostrůvků perlitu patrným usměrněním, obr. 48 a 49. Na obrázku 49 je zřejmé úzké pásmo oduhličeného povrchu s jemnějšími feritickými zrny. Hluběji pod povrchem sejevila matrice trubky hrubozrnnější s tvarově nestejnoměrnými, místy až jehlicovitými ostrůvky perlitu a feritu, obr. 50. Ve spodní polovině tloušťky stěny trubky byla v cca $\frac{1}{5}$ vzdálenosti od povrchu mikrostruktura podobná, obr. 51. 52. Podél vnitřního povrchu bylo zřejmé nesouvislé řádkovité usměrnění perlitu a feritu, obr. 51 a 53. Pro doplnění je na obrázcích 54 až 59 uvedena ukázková mikrostruktura v podélném směru trubky. Na základě metalografického hodnocení nebyly mezi podélně a příčně orientovanými výbrusy shledány žádné významné rozdíly.



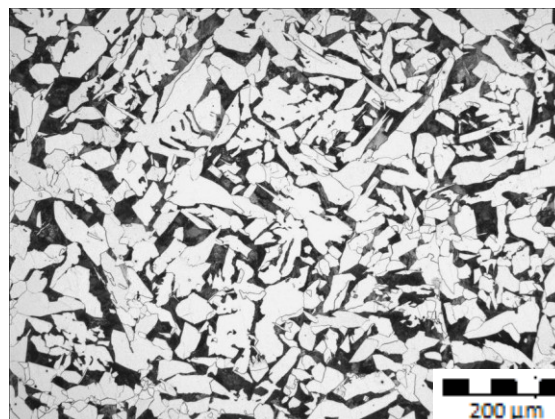
Obr. 48 Vzorek 5, vnější povrch

zv. 12,5x



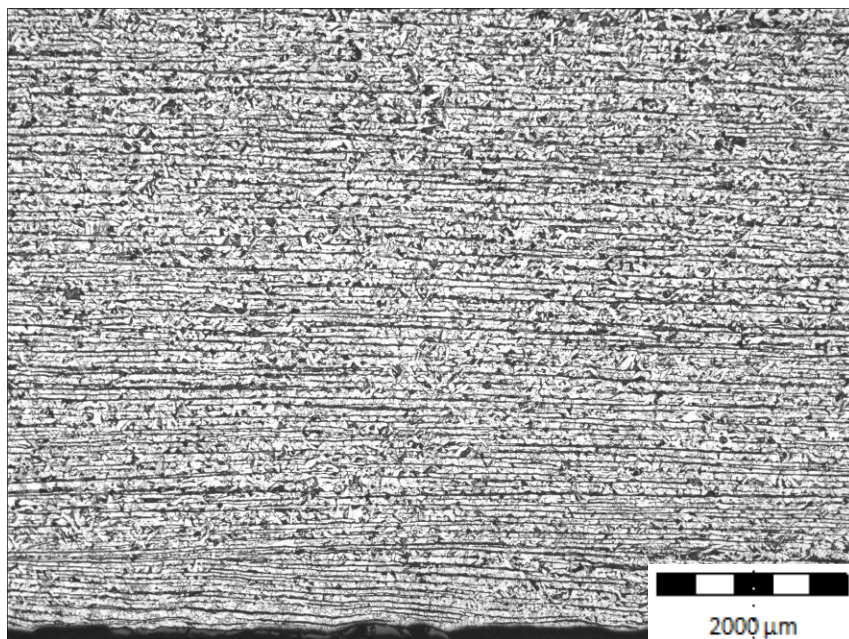
Obr. 49 Vz. 5, vnější povrch

zv. 100x



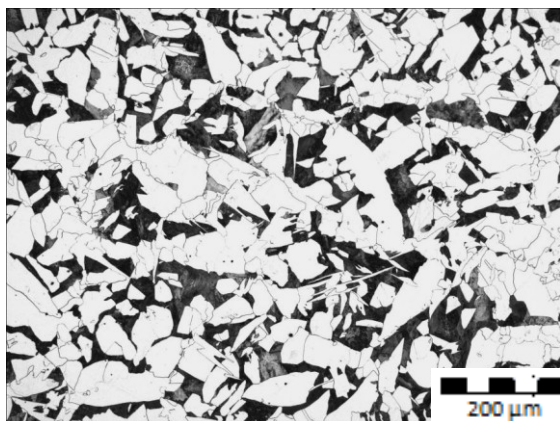
Obr. 50 Vz. 5, větší vzdálenost od povrchu

zv. 100x



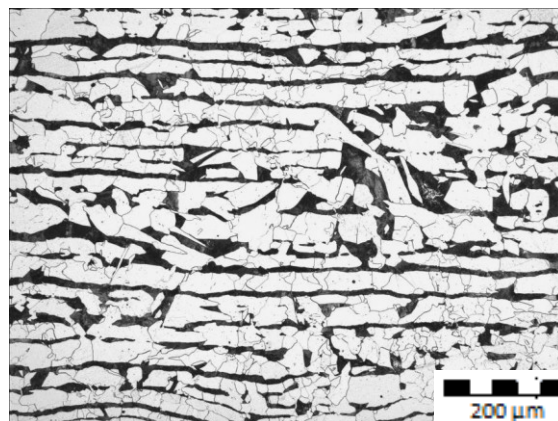
Obr. 51 Vzorek , vnitřní povrch (4)

zv. 12,5x



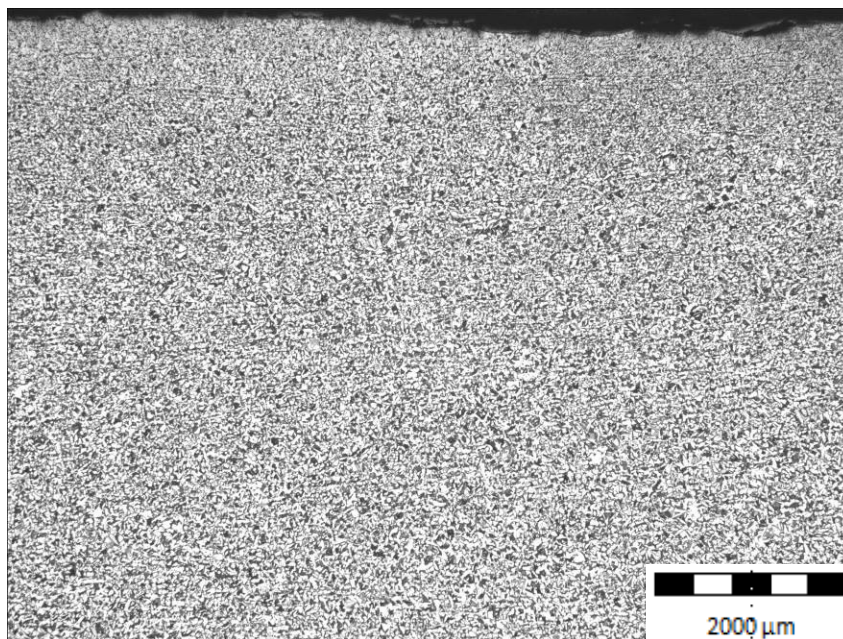
Obr. 52 Vz. 5U, dále od povrchu

zv. 100x



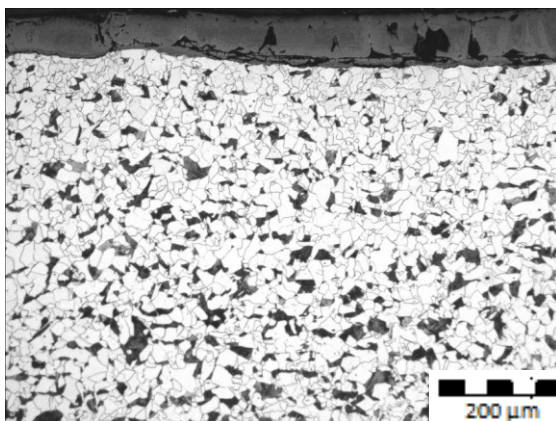
Obr. 53 Vz. 5U, vnitřní povrch

zv. 100x



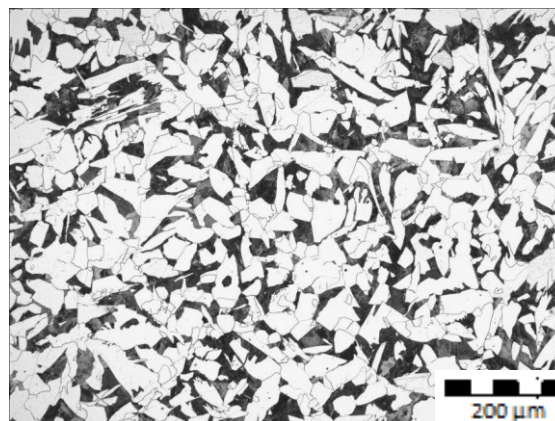
Obr. 54 Vzorek 5P, vnější povrch

zv. 12,5x



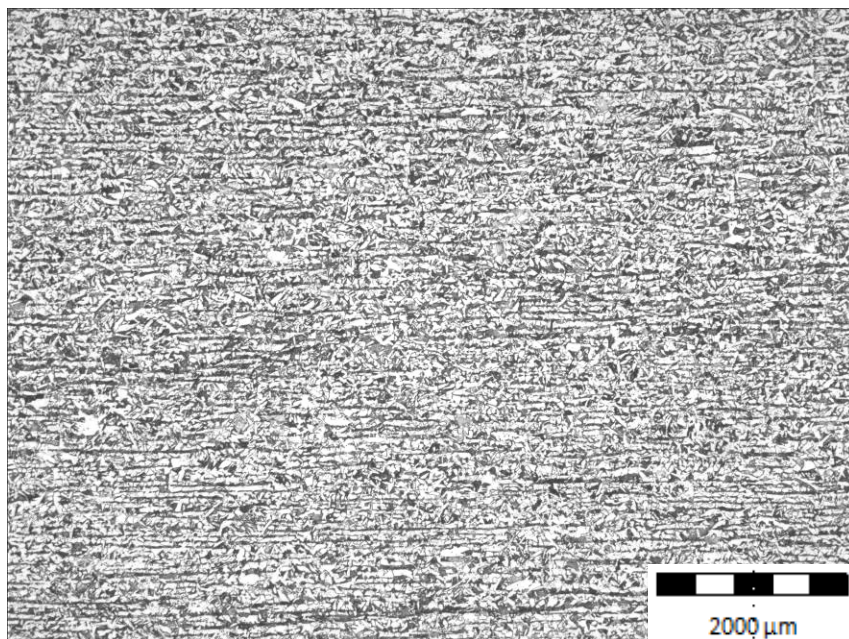
Obr. 55 Vz. 5P, vnější povrch

zv. 100x



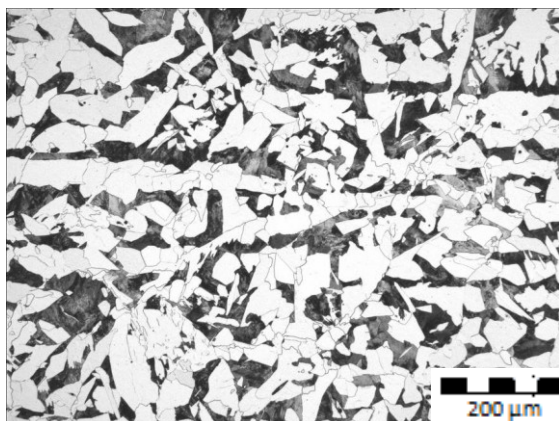
Obr. 56 Vz. 5P, dále od povrchu

zv. 100x

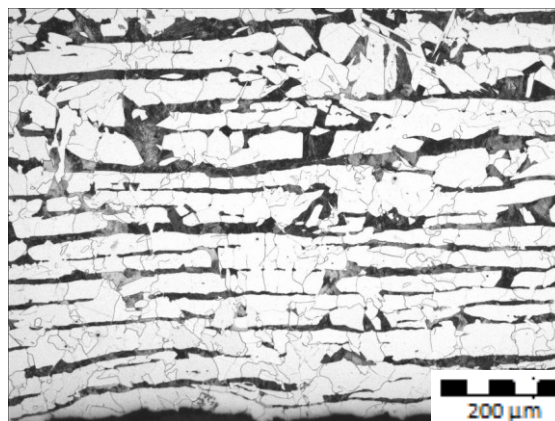


Obr. 57 Vzorek 5PU, vnitřní povrch

zv. 12,5x



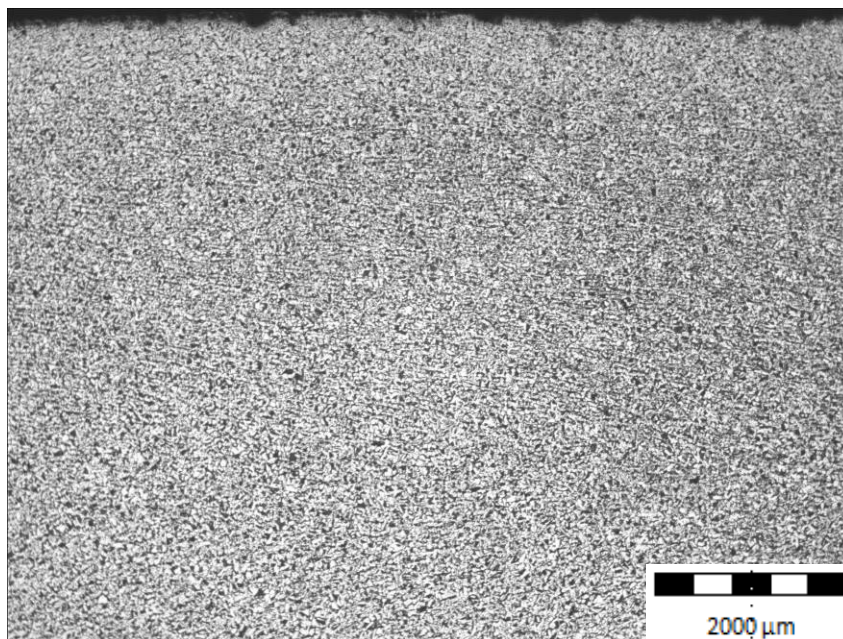
Obr. 58 Vz. 5PU, dále od povrchu zv. 100x



Obr. 59 Vz.5PU, vnitřní povrch zv. 100x

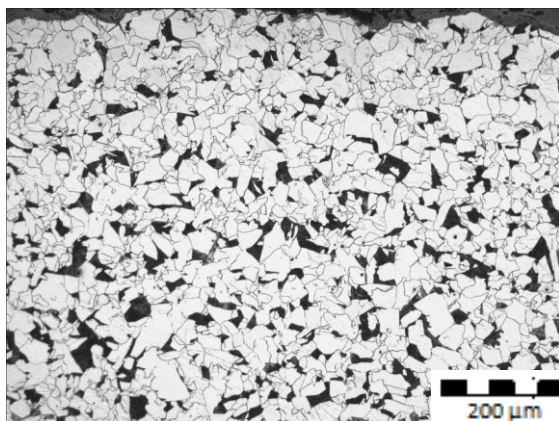
Vzorek 6 a 6U

Při rozboru vzorků předvalku č. 6 byla podél vnějšího mírně oduhličeného povrchu pozorována polyedrická jemnozrnná struktura se známkami usměrnění feritu a perlitu, obr. 60 a 61. Ve větší hloubce pod povrchem se jevila kovová matrice mírně hrubozrnnější s osově nesouměrnými feritickými zrny a perlitickými bloky, obr. 62. Ve spodní polovině tloušťky stěny byla v oblasti dále od vnitřního povrchu detekována mikrostruktura usměrněnější, obr. 63 a 65. Podél vnitřního obvodu bylo patrné výraznější řádkovité uspořádání perlitické složky, obr. 64.



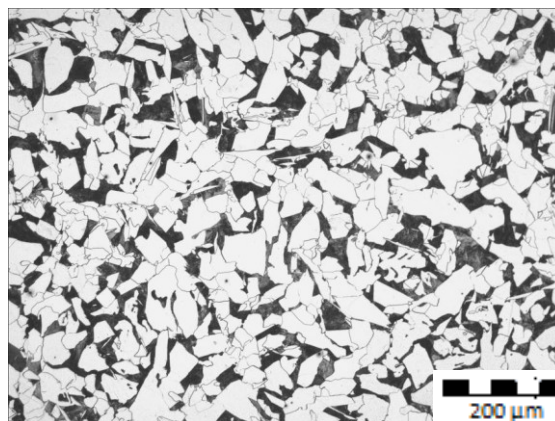
Obr. 60 Vzorek 6, vnější povrch (1)

zv. 12,5x



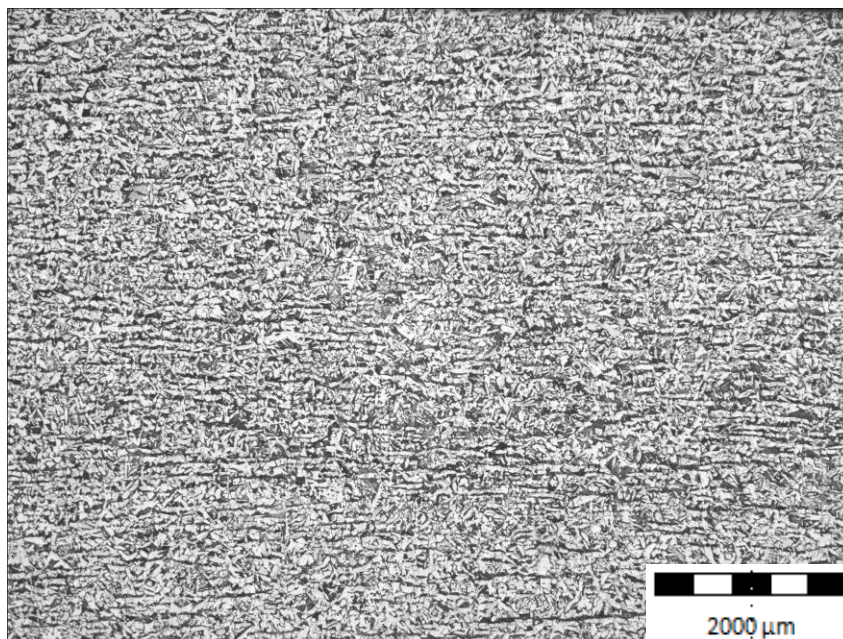
Obr. 61 Vzorek 6, vnější povrch

zv. 100x



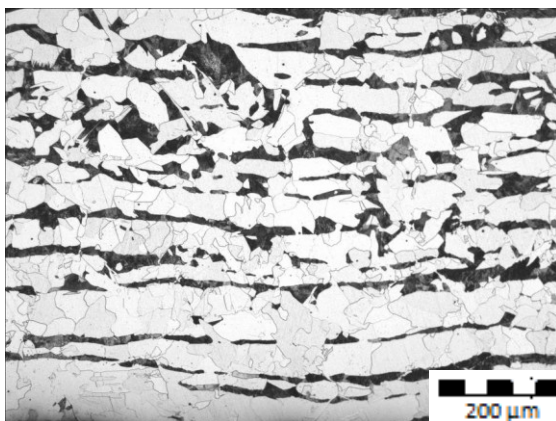
Obr. 62 Vz. 6, oblast dále od povrchu

zv. 100x



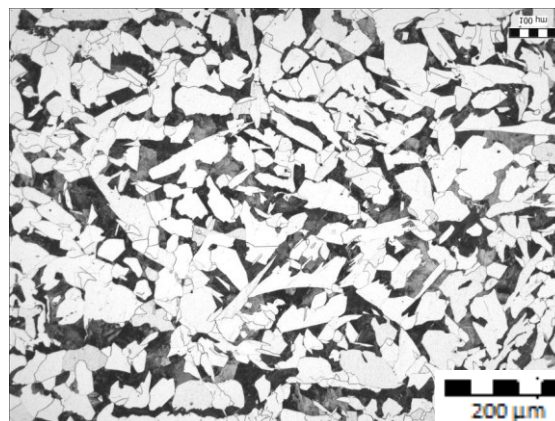
Obr. 63 Vzorek 6U, oblast (3)

zv. 12,5x



Obr. 64 Vz.k 6U, vnitřní povrch

zv. 100x

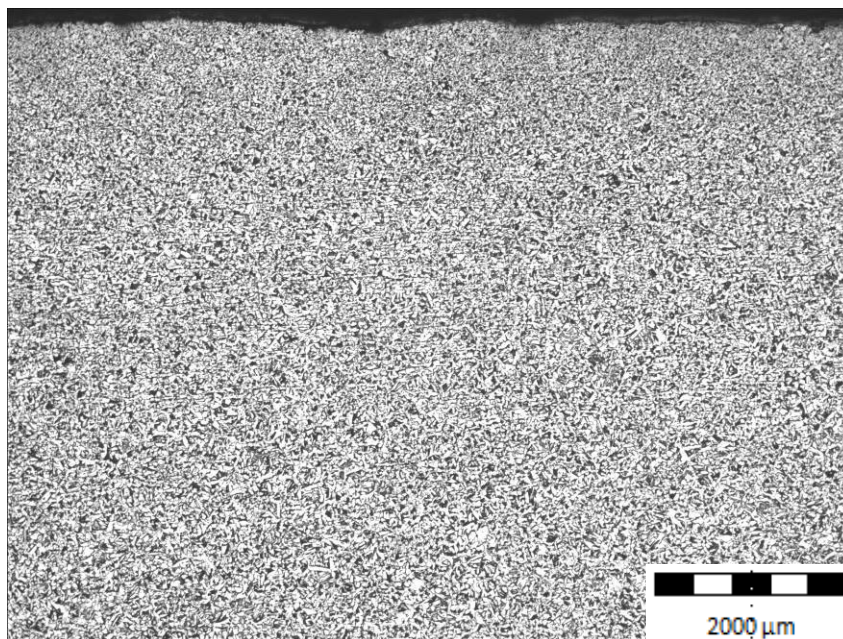


Obr. 65 Vz. 6U, dále od vnitřního povrchu

zv. 100x

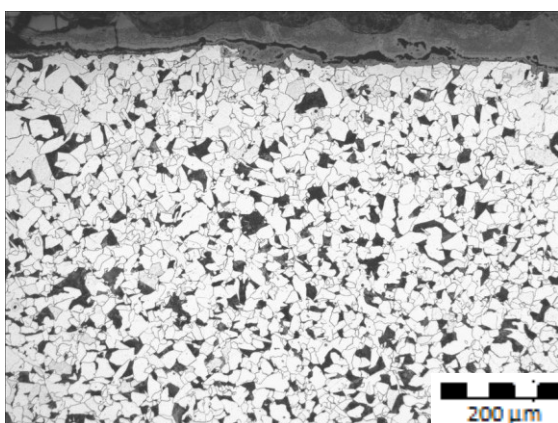
Vzorek 7 a 7U

V bezprostřední blízkosti vnějšího povrchu (vzorek 7) bylo zaznamenáno poměrně rovnoměrné rozložení feritu a perlitu, obr. 66, 67. Hlouběji pod povrchem se jevila mikrostruktura lehce usměrněná, hrubozrnnější s lokálním výskytem deskových až jehlicovitých útvarů feritu, obr. 68. U vzorku 7U byla mikrostruktura podobná, obr. 69. Podél vnitřního obvodu trubky byly zaznamenány místy souvislé pásy perlitické složky souběžné s vnitřním povrchem, obr. 70. Ve větší vzdálenosti se opět struktura jevila hrubozrnnější obr. 71.



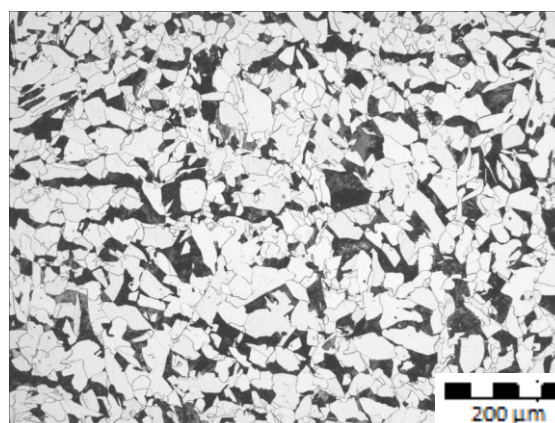
Obr. 66 Vzorek 7, vnější povrch

zv. 12,5x



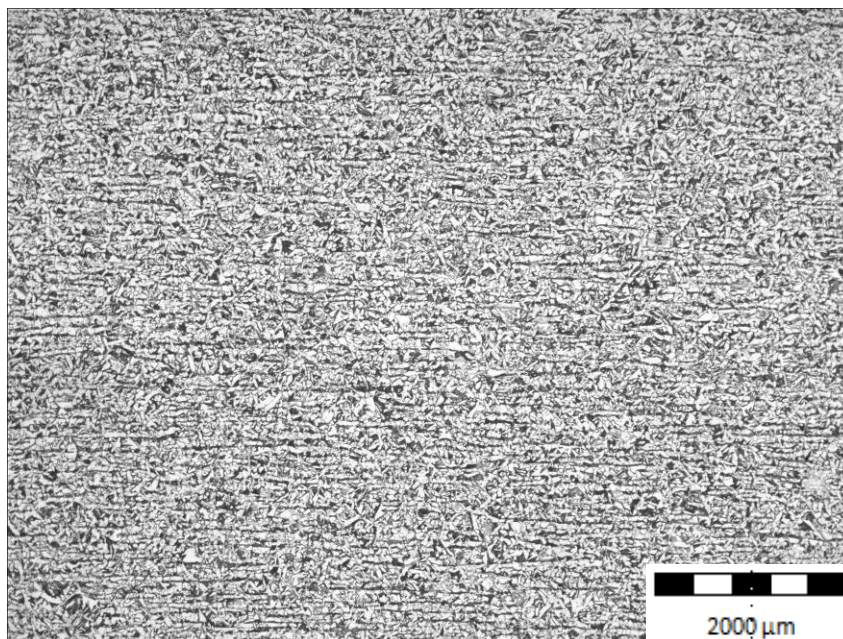
Obr. 67 Vzorek 7, vnější povrch

zv. 100x



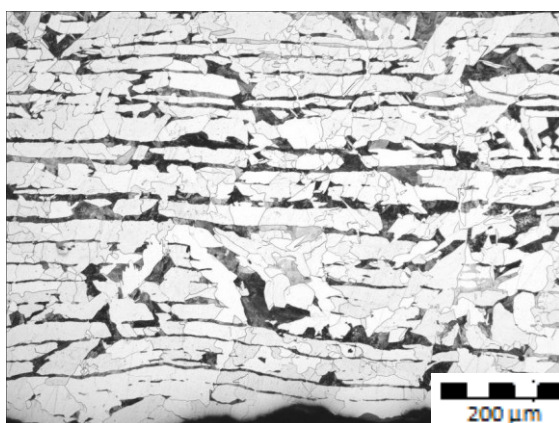
Obr. 68 Vz. 7, dále od povrchu

zv. 100x

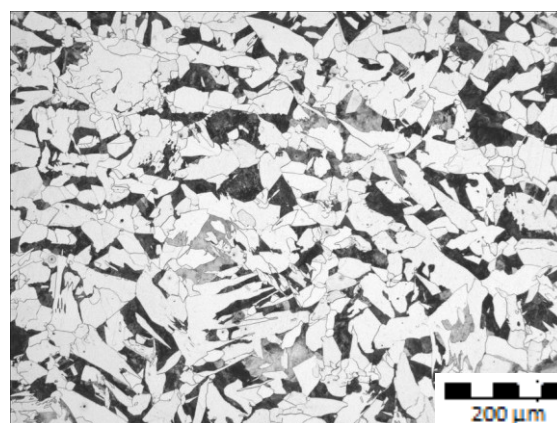


Obr. 69 Vzorek 7U, vnitřní povrch

zv. 12,5x



Obr. 70 Vzorek 7U, vnitřní povrch zv. 100x



Obr. 71 Vz. 7U, dále od povrchu zv. 100x

4.3 EBSD analýza vzorku č.8

Pro účely EBSD analýzy byly vzorky připraveny mechanickým leštěním s finálním doleštěním na koloidním roztoku částic SiO_2 o zrnitosti 50 nm. EBSD analýzy byly u všech vzorků provedeny ve vzdálenosti cca 1mm pod zoxidovaným povrchem (vnitřní nebo vnější povrch trubek), kde již nebylo pozorováno částečné oduhličení struktury. Výsledky EBSD byly pro všechny vzorky zpracovány stejným způsobem. Výstupy EBSD analýzy zahrnují:

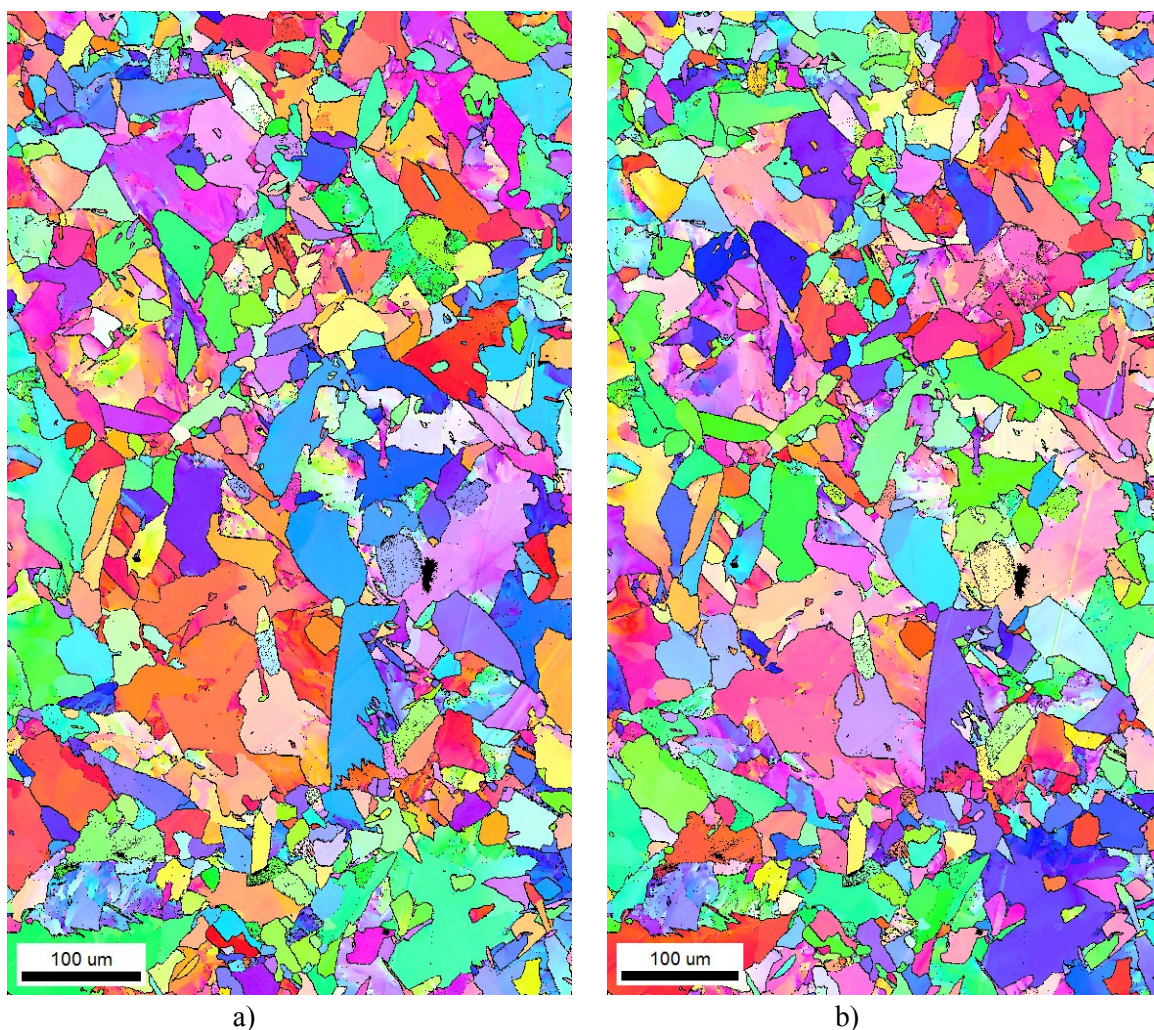
- krystalové orientační mapy pro směr válcování (RD) a směr kolmý k povrchu jednotlivých výbrusů (ND),
- inverzní pólové obrazce pro směry vzorku [100] (RD – směr válcování), [010] (TD – příčný směr) a [001] (ND – směr kolmý k povrchu vzorku), v obrazcích jsou zvýrazněna největší zrna v analyzované oblasti,

- pólové obrazce pro roviny $\{001\}$, $\{110\}$ a $\{111\}$, zobrazeny byly jednak všechny výsledky analýzy (max. 3 500 000 pixelů (analyzovaných bodů v každé oblasti), a jednak byla zvýrazněna největší zrna přítomná v analyzovaných oblastech,
- byly vyhodnoceny velkoúhlové hranice zrn – pro stupeň dezorientace větší než 15° ,
- byly vyhodnoceny nízkoúhlové hranice zrn – pro stupeň dezorientace $5^\circ < \alpha < 15^\circ$,
- u vybraných vzorků byla oblast analyzovaná technikou EBSD zdokumentována i za použití světelné mikroskopie [10].

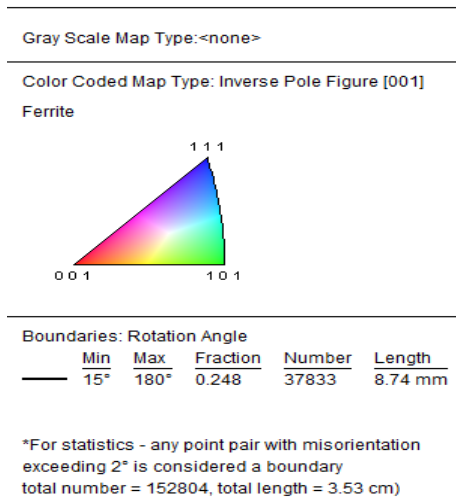
Označení vzorků dle provedení odběru :

- vzorek PX 56746 – příčný směr, vnější povrch,
- vzorek SX 56746 – příčný směr, vnitřní povrch,
- vzorek S 56746 – podélný směr, vnitřní povrch

vzorek S56746



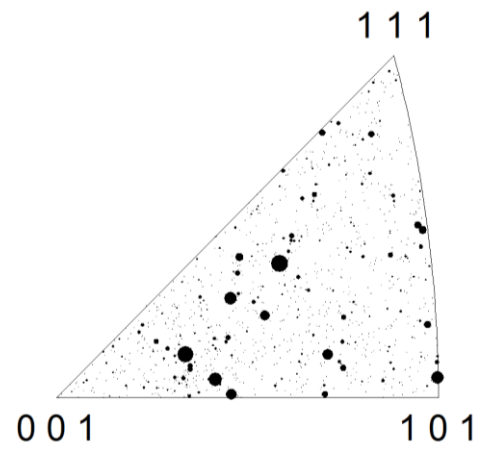
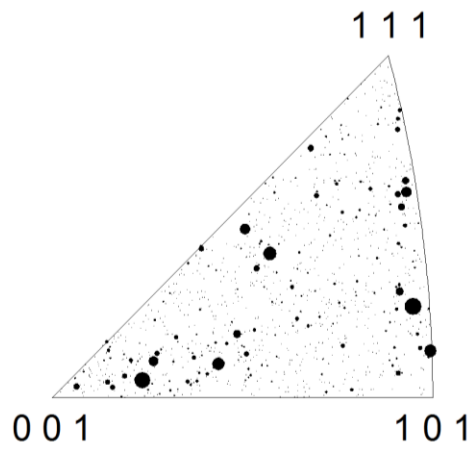
Obr. 72 Krystalové orientační mapy pro: a) směr RD, b) směr ND



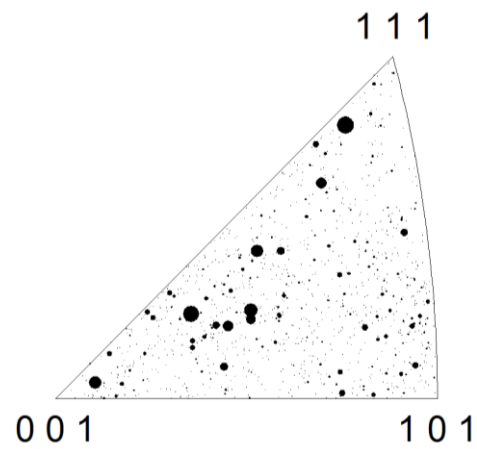
Obr. 73 Legenda k barevnému kódování obr.72

[100]

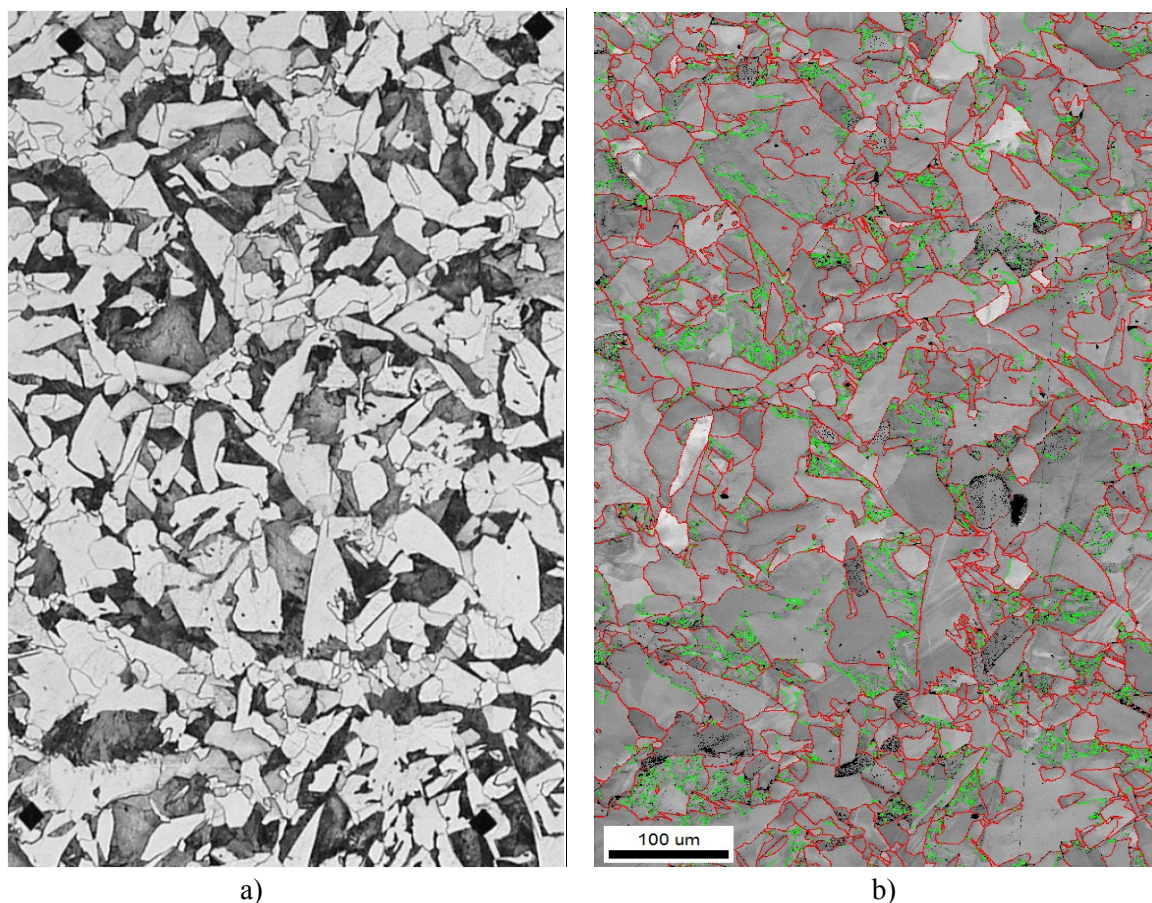
[010]



[001]

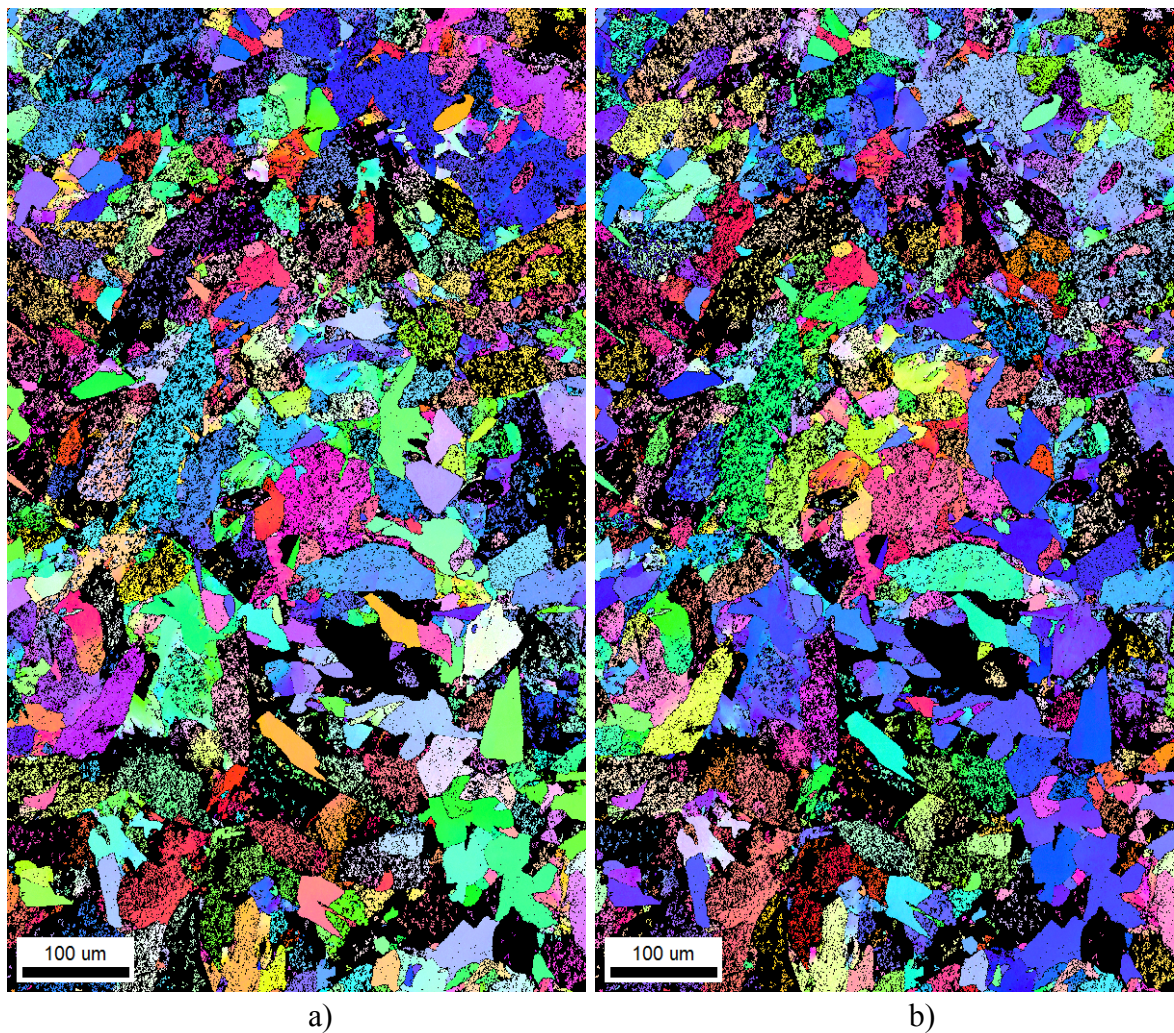


Obr. 74 Mapy inverzních pólových obrazců pro: a) směr RD, b) směr TD, c) směr ND

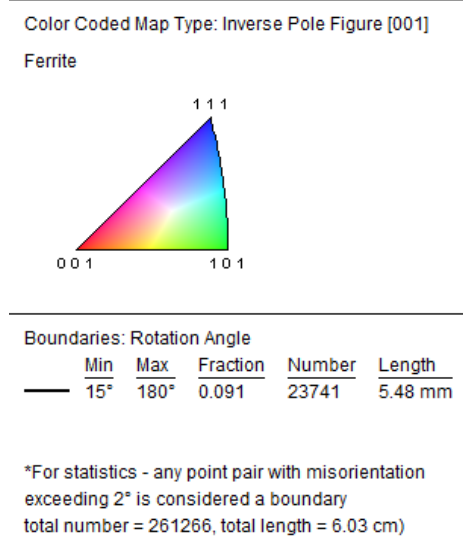


Obr. 75 Korelace analyzované oblasti za použití různých technik strukturní analýzy, a) světelná mikroskopie, b) IQ mapa s vyznačenými velkoúhlovými a nízkoúhlovými hranicemi zrn

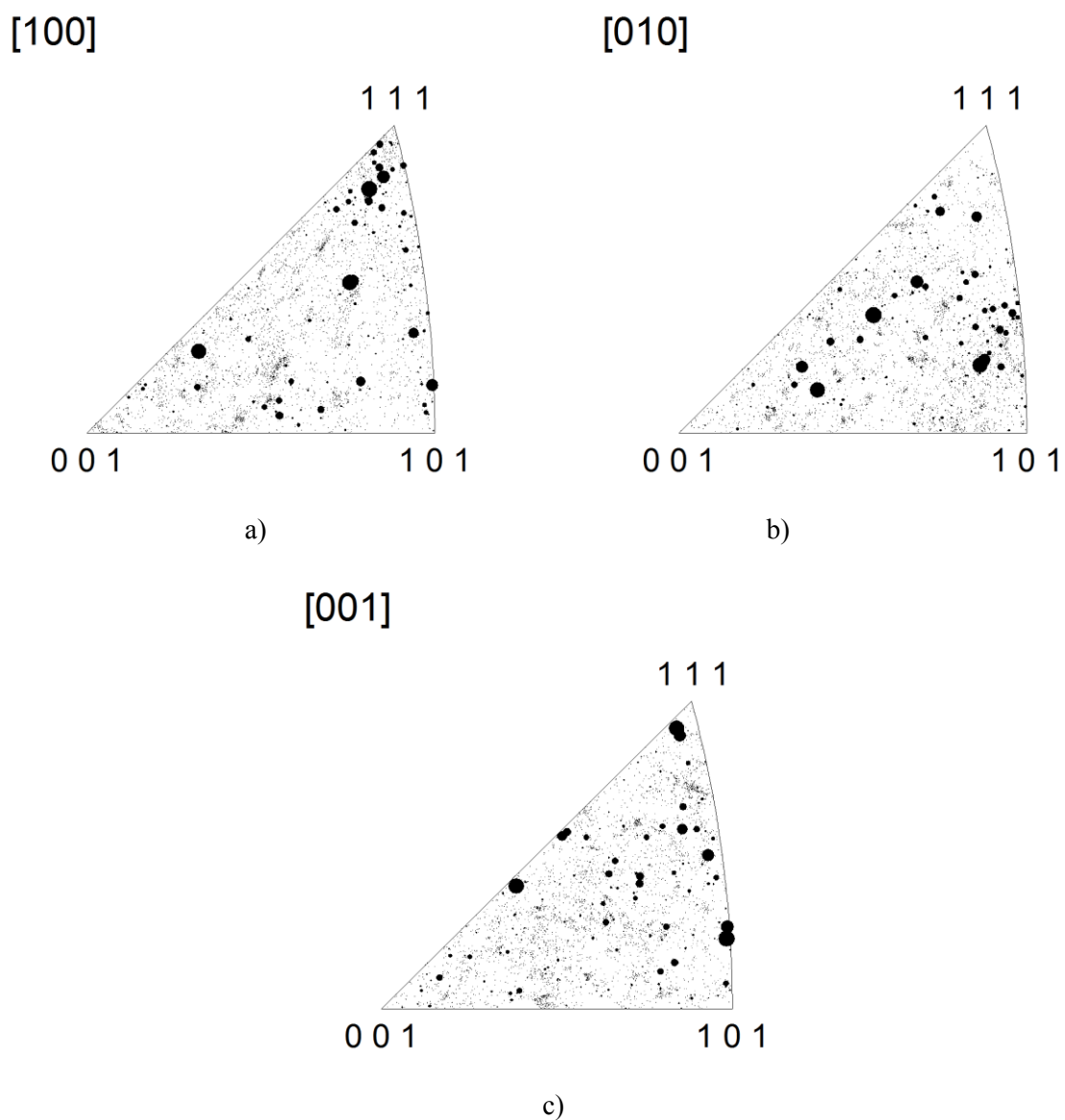
vzorek SX56746



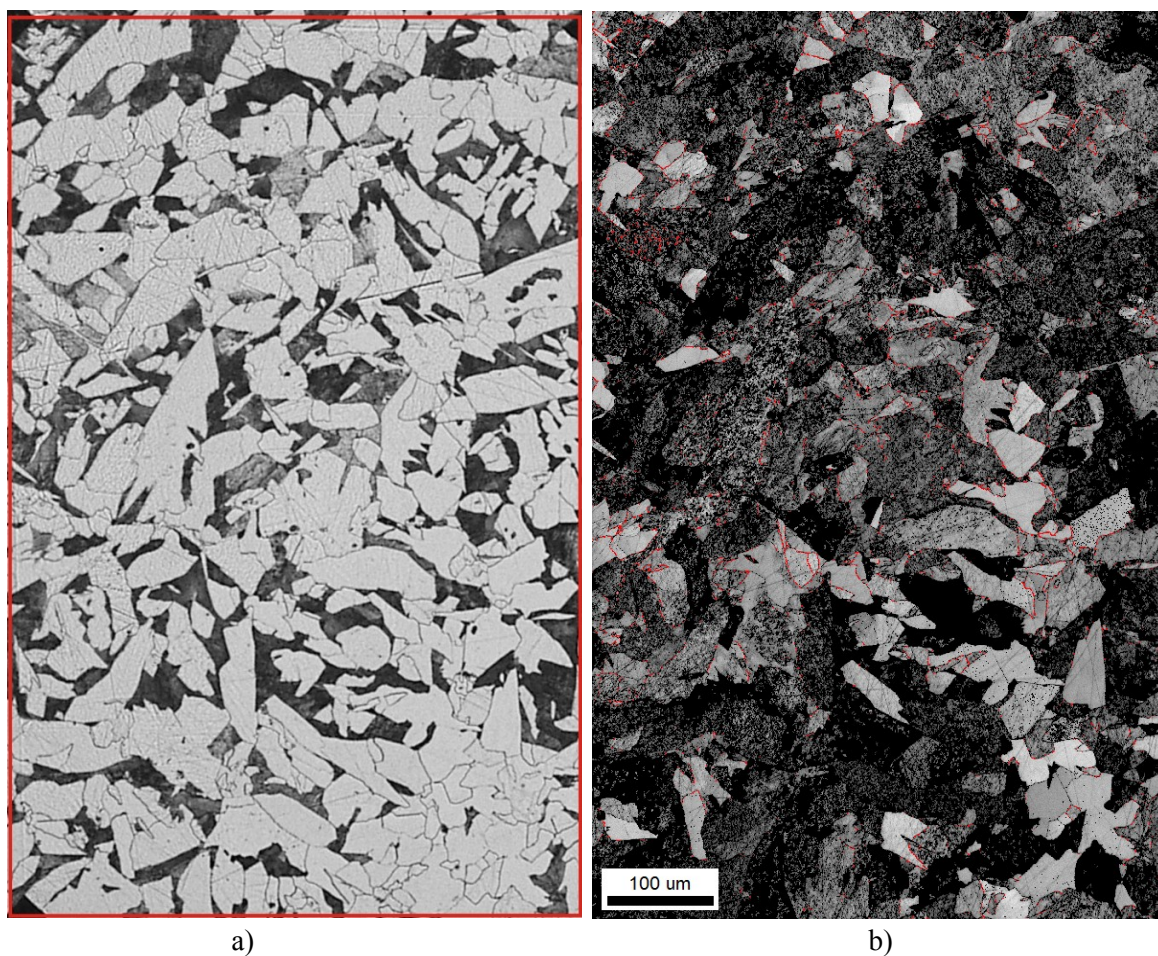
Obr. 76 Krystalové orientační mapy pro: a) směr ND, b) směr RD



Obr. 77 Legenda k barevnému kódování obr.76

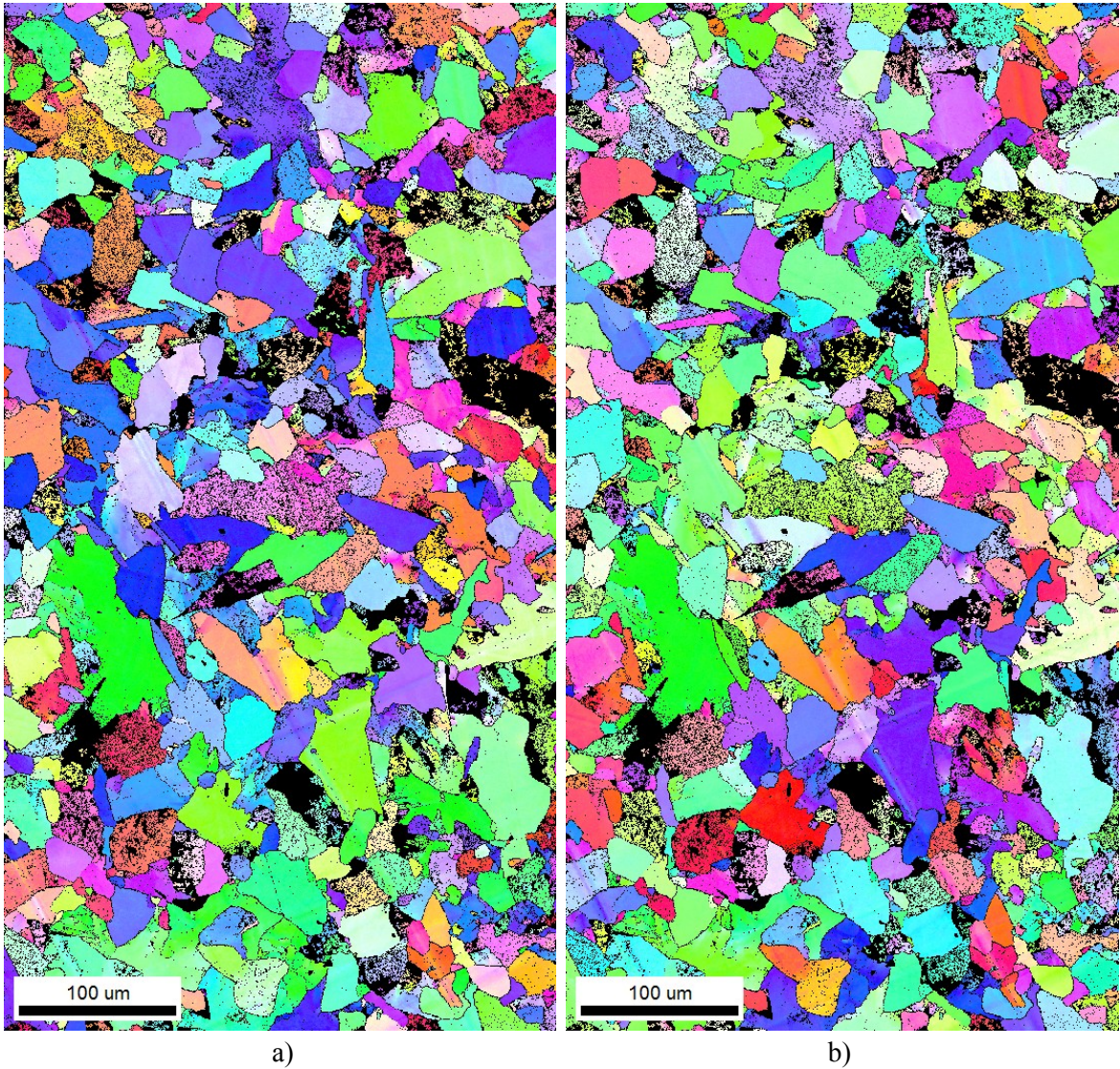


Obr. 78 Mapy inverzních pólových obrazců pro: a) směr RD, b) směr TD a c) směr ND, velká zrna

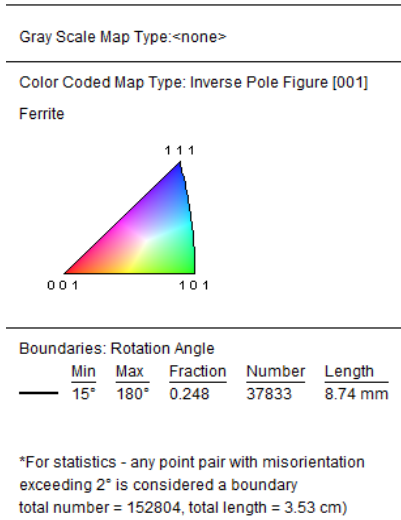


Obr. 79 Korelace analyzované oblasti za použití různých technik strukturní analýzy, a) světelná mikroskopie, b) Obr. 3 IQ mapa s vyznačenými velkoúhlovými hranicemi ($\alpha > 15^\circ$) zrn

Vzorek PX56746



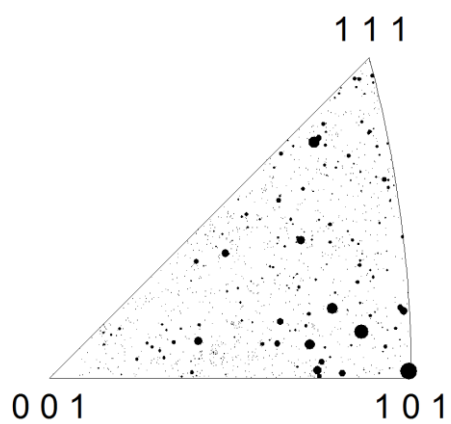
Obr. 80 Krystalové orientační mapy pro: a) směr ND, b) směr RD



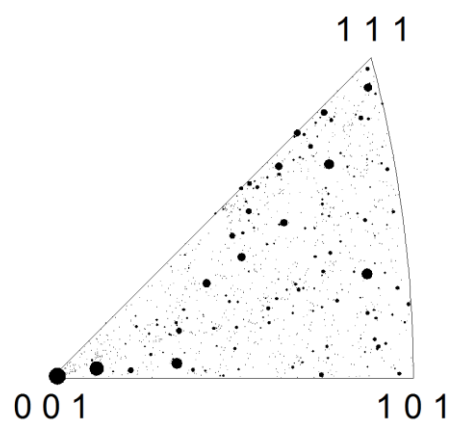
Obr. 81 Legenda k barevnému kódování obr. 80

[100]

[010]

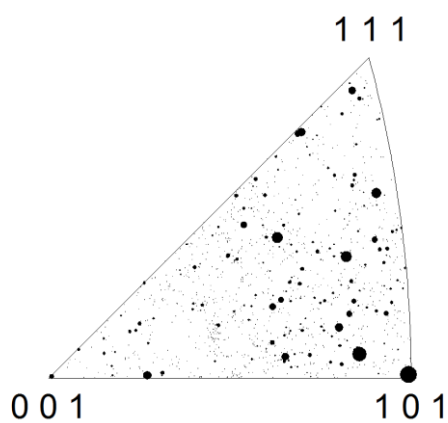


a)



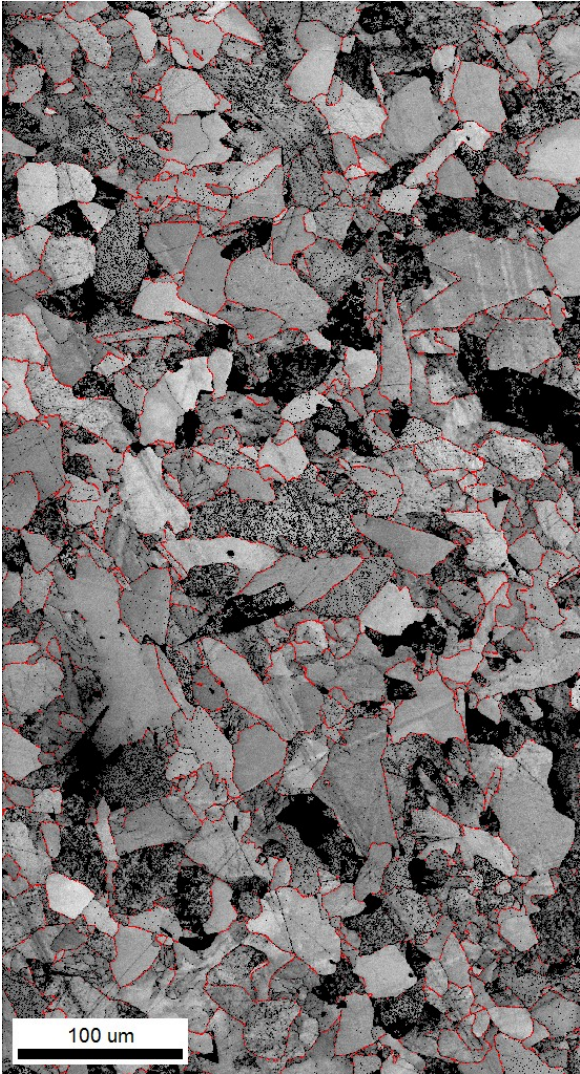
b)

[001]

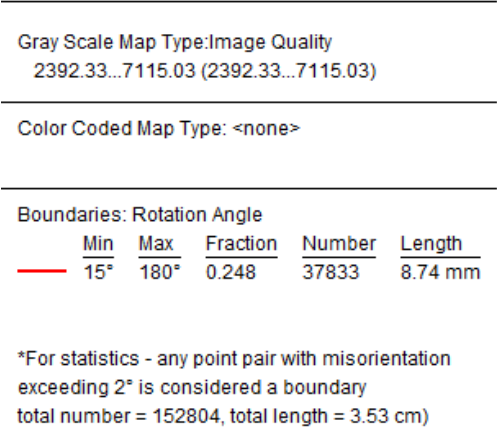


c)

Obr. 82 Inverzní pólové obrazce pro: a) směr RD, b) směr TD, c) směr ND



Obr. 83 Mapa IQ s vyznačenými velkoúhlovými hranicemi ($\alpha > 15^\circ$)



Obr. 84 Legenda k obr. 83

5. Závěr

Cílem této práce bylo posouzení vlivu vstupního rozměru kontislitku na strukturu vyděrovaného předvalku při různých způsobech děrování. Různými způsoby děrování bylo myšleno dosažení odlišných rozměrových parametrů předvalku, a to především vnějšího průměru, vůči průměru vstupního kontislitku. Při dosažení menšího konečného vnějšího průměru mluvíme o tzv. úženi materiálu, při dosažení většího výstupního průměru předvalku pak o šíření či rozšiřování. Oba tyto způsoby byly porovnávány pro vsázku průměru 320 a 410 mm. V případě vsázky průměru 470 mm, která má pouze omezenou oblast použití, se jednalo o děrování na maximálních průměrech děrovacích hrotů a posuzován byl možný vliv změny průměru pracovních válců.

Pokud srovnáme předpokládané deformace, které vycházely z výpočtů založených na zákonu o zachování objemu, jsou tyto deformace ve všech prověřovaných případech podstatně nižší než skutečně dosažené deformace počítané ze změny příčného průřezu materiálu před a po děrování. Pokud porovnáváme jednotlivé způsoby děrování právě pomocí deformace stanovené ze změny příčného průřezu, nejsou zde výrazné rozdíly pro jednotlivé průměry vsázky a pohybují se v rozmezí od 2,3 do 2,9, kdy největší deformace je dosaženo při rozšiřování vsázky průměru 410 mm na trnu průměru 320 mm. Velikosti deformace se tedy výrazně nelišily. Zajímavým jevem byl výrazně vyšší vnitřní průměr předvalku nežli průměr použitého děrovacího hrotu u všech vyděrovaných kusů. Tento jev je zřejmě způsoben vlastní kalibrací děrovacích válců v kombinaci s tvarem požitého děrovacího hrotu a zároveň vstupními a výstupními rozměry jednotlivých kusů. Jistý vliv může mít i rychlost děrování, kterou ovšem na děrovací stolici Velkého Mannesmannu nelze bez změny velikosti deformace pro konstantní otáčky děrovacích válců měnit. Určitou změnu děrovací rychlosti způsobila změna průměru děrovacích válců, která však dle výpočtů a měření neměla významný vliv na dosažené deformace. Změna průměru děrovacích válců v rozsahu používaných průměrů nepřipouští výraznou změnu obvodové rychlosti válců, z čehož vyplývá jen malá změna rychlosti děrování vyvolaná změnou průměru válců.

Pro porovnání vlivu jednotlivých průměrů vsázky a způsobu děrování bylo provedeno rovněž vyšetření mikrostruktury pro jednotlivé případy děrovaných předvalků. Struktury všech provalků byly u vnějšího povrchu v zásadě jemnozrnné tvořené směsí feritu a perlitu, ve větší vzdálenosti od povrchu se struktura jevila jako hrubozrnnější, což poukazuje na nerovnoměrnou deformaci po průřezu jednotlivých kusů a rozdílnou rychlost ochlazování předvalku. Na vnitřním povrchu pak byla pozorována řádkovitost, která je pravděpodobně způsobena větším protažením zrn u vnitřního povrchu předvalku. Rovněž zde se jevila struktura hrubozrnnější než u vnějšího povrchu. Tento jev je zřejmě způsoben různou intenzitou ochlazování (odvodu tepla) obou povrchů vyděrovaných předvalků. U vzorku č. 3 byly v části odebrané blíže k vnitřnímu povrchu zjištěny zřejmě pozůstatky původního austenitického zrna, které si vzhledem k běžnému vychlazování předvalku, volně na vzduchu, nelze zcela vysvětlit, jelikož zbytkový austenit bývá ve struktuře zpravidla pozorován při martenzitické přeměně (rychlém ochlazování austenitu).

Domnívám se tedy, že výskyt tohoto typu struktury bude spojen se stavem původního netvářeného materiálu (lité struktury). V strukturách dalších vzorků byly rovněž pozorovány útvary jehlicovitého ferritu, což poukazuje na středně rychlé ochlazování materiálu. Při porovnání struktury v podélném a příčném směru (provedeno u vzorku č. 5) nebyly nalezeny pozorovány žádné výrazné rozdíly. Rovněž v příčném směru pozorována výraznější řádkovitost u vnitřního povrchu, způsobená zřejmě větším protažením zrn tvářeného materiálu u vnitřního povrchu a následným nerovnoměrným ochlazováním.

Jelikož v nedávné minulosti nebyly nikdy předvalky předmětem podobného šetření, s výjimkou metalografického posuzování mikrostruktur při vzniku povrchových vad, lze považovat výsledek experimentu za prvotní informaci o stavu materiálu po děrování. Další oblastí pro pokračování v popisu kosého válcování by mohlo být zkoumání vlivu deformační rychlosti. Při prozkoumání geometrie předvalků a zjištění značné nerovnoměrnosti vnitřního průměru lze uvažovat i o možné změně kalibrace pracovních válců a to ve výstupní části pracovních válců, v pásnu příčného rozválcování.

Vzhledem k výše uvedeným závěrům porovnání mikrostruktury jednotlivých vzorků lze konstatovat, že nebyl zjištěn žádný zásadní vliv rozměru vstupního kontislitku ani zvoleného způsobu děrování, na výslednou strukturu tvářeného materiálu.

Seznam použité literatury

- [1] POČTA B. *Ocelové trubky: jejich výroba a použití*. Praha SNTL 1954. 282 s.
- [2] POČTA B. *Ocelové trubky I. díl*. Praha SNTL 1963. 413 s.
- [3] KOMORI K. *Simulation of Mannesmann piercing process by the three-dimension rigid - plastic finite - element Method, International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 47, Issue 12, December 2005, Pages 1838 - 1853.
- [4] CHASTEL, Y., DIOP, A., FANINI, S., BOUCHARD, P. O. Finite element modeling of tube piercing and creation of a crack. [i]International Journal of Material Forming 1[i], Supplement 1 (2008), Pages 355-358.
- [5] BRENSING, K-H., SOMMER, B., Steel tube and pipe manufacturing processes. http://www.smrw.de/files/steel_tube_and_pipe.pdf
- [6] FANINI, S., GHIOTTI, A., BRUSHI, S. Prediction of the fracture due to Mannesmann effect in tube piercing. [i]AIP Conference Proceedings[i] 908, 1407 (2007).
- [7] ŽÍDEK M., *Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena*. Praha 1995.
- [8] SCHINDLER I., *Metalurgická tvařitelnost oceli*. Ostrava 1999.
- [9] MIGDAL M., *Technická příručka zařízení*, TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a. s., duben 2014
- [10] TUROŇ R., *Optimalizace technologie děrování a tepelného zpracování trubek mikrolegovaných a nízkolegovaných ocelí pro použití v petrochemickém a stavebním průmyslu, Roční zpráva o řešení projektu TVP č. 480 v roce 2013*, TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a. s., leden 2014